



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
De la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira – Bejaia



Faculté de Technologie

Département D'Architecture

Domaine : Architecture, urbanisme et métiers de la ville

Filière : Architecture

Spécialité : Architecture

Master 1, Spécialité « Architecture »

Matière : **STRUCTURE 1**

Polycopie de cours en vue d'expertise

Responsable de la matière : **Mme. BOUDINA Tounsia**
Année universitaire : 2024/2025

PALIER MASRER	INTITULE DE LA MATIERE			SEMESTRE 1
	Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers de la Ville			
NIVEAU M1	Filière : Architecture		Spécialité : Architecture	DATE
LIEU D'ENSEIGNEMENT	UNITE D'ENSEIGNEMENT	V.H.S (H)	CREDITS	COEFFICIENT
	STRUCTURE 1 UEF 1–SEMESTRE 1	45h	3	2
INTERVENANTS	Mme / Mr : BOUDINA Tounsia		Mme / Mr :	
	GRADE : M.C.A		GRADE :	
	Email pro. T.boudina@univ-bejaia.dz		Email pro.	
DESCRIPTION	La matière structurel permet aux étudiants de Master d’acquérir des informations sur les infrastructures de l’ouvrage. En basant sur l’initiation des étudiants aux reconnaissances des sols en géotechnique ; en suite elle donne un atout sur les fondations profondes. Comme elle vise à initier l’étudiants de se référer aux différentes situations sismiques. Afin d’assurer la stabilité des structures et des ouvrages selon le règlement parasismique algérien la matière Structure-1 élargie les connaissances sur les nouveaux procédés de construction et le choix des matériaux (béton, métal, mixte et béton précontraint) dans la conception architecturale et sur le pré dimensionnement des ouvrages spécieux en collaboration avec d’autre intervenant dans le bâtiment (ingénieur, laboratoire et organisme de contrôle).			
OBJECTIF GENERAL DE LA MATIERE D'ENSEIGNEMENT	La formation a pour objectif de : ➤ Acquisition des informations et des connaissances sur les acteurs de l’acte de bâtir et de la nécessité de la coordination (avec les ingénieurs) ➤ Initiation aux choix ses structures dans la conception architecturale et sur le prédimensionnement des ouvrages spéciaux			
OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE	L’objectifs d’apprentissage visent : ➤ Acquisition des connaissances fondamentales sur les différents systèmes constructifs qui permet à l’étudiant d’opérer le choix parmi les éventail des solutions technologiques existantes pour la réalisation de projet. ➤ Initiation aux choix des systèmes constructifs et des techniques appropriées aux projet architectural.			
PRE-REQUIS	Pour une bonne conduite de cette matière, l’étudiant doit se baser sur ces efforts et compétences individuels, et sur l’ensemble des connaissances acquises pendant sa formation en licence, à savoir Technologie des matériaux de construction 1 et 2, Construction 1 et 2, Structure 1 et 2.			
APERCU INDICATIF DU PROGRAMME DISPENSE	La formation se déroulera avec des cours magistraux dispensé en salle (en Power-Point) avec la publication des résumés en format PDF et des séries de TD sur la plateforme Learning.			
MATERIEL OBLIGATOIRE				

ORGANISATION DE LA MATIERE	Cours H	T.D H	T.P H	Stage H	Sortie d'étude U
	1h30	1h30	/	/	/
SYSTEME D'EVALUATION	Examen programmé : 60 %			Contrôles continus : 40 %	
PLANNING PREVISIONNEL DU SEMESTRE	Arrêt de : cours/ Ateliers/ TD : le 15/12/2022				
	Rendus : TD/ Affichage Atelier :				
	Période examens : à partir du 8 /01/2023				
	Dates de vacances : du 17/12/2022 – 07/01 /2023 (dates officielles)				
	Fin Semestre 1 :				
CALENDRIER DES ENSEIGNEMENTS	COURS MAGISTRAL / ATELIER		TD / LOGE		
SEMAINE 01	Introduction à la géotechnique				
SEMAINE 02	Introduction à la géotechnique		Exercices sur les caractéristiques physiques et mécaniques des sols		
SEMAINE 03	Fondations spéciales				
SEMAINE 04	Fondations spéciales		Exercices sur les différents types des fondations (superficielles et profondes) calcul de coffrage et ferrailage.		
SEMAINE 05	Stabilité des structures d'ouvrages vis-à-vis des efforts sismiques				
SEMAINE 06	Stabilité des structures d'ouvrages vis-à-vis des efforts sismiques		- Exercices sur les calculs de la force sismique dans les constructions - Utilisation du règlement parasismique en Algérie		
SEMAINE 07	Stabilité des structures d'ouvrages vis-à-vis des efforts sismiques		Exercice sur traitement des cas pathologique (photos pour la reconnaissance de phénomènes)		
SEMAINE 08	Systèmes porteurs des bâtiments métalliques		Exercices sur les grandes portées		
SEMAINE 09	Les structures des immeubles de grande hauteur (IGH)				
SEMAINE 10	Les structures des immeubles de grande hauteur (IGH)		Exercices sur la réglementation en vigueur		
SEMAINE 11	Les structures mixtes (Acier-Béton)		Exercices sur la reconnaissances des différents élément de la construction métallique		
SEMAINE 12	Les structures mixtes (Acier-Béton)		Exercices sur la reconnaissances des différents élément de la		

		construction mixte
SEMAINE 13	Le règlement parasismique algérien RPA99/2003	Application de RPA 2024 (Etude de cas)
SEMAINE 14	Le règlement parasismique algérien RPA 2024	
REFERENCES OUVRAGES EXISTANTS DANS LA BIBLIOTHEQUE DE L'UNIVERSITE	- Francis D. K. Ching. Guide technique et pratique de la construction, - Capra A., Davidovici V .Calcul dynamique des structures, Eyrolles, Paris 1984 - Zacek M., Construction parasismique, Parenthèses 1996 - RPA Alger 2003et 2010 - Eduardo Torroja .Structures Architecturales - Matthys Levy et Mario Salvadori. Comment ca tombe? - Andrew W Charleson .Structure as architecture, - A Muttoni .L'art des structures, - Philip Garriso. Architectural Structures for Engineers and Architects - R. Vittone : Bâtir, manuel de la construction. Ed. P.P.U.R.	
CONSEILS A DONNER AUX ETUDIANTS	-La prise de notes pendant les cours. -Assiduité des cours pour la réussite et la compréhension de la matière. -Préparation des travaux TD demandé. -La préparation aux examens.	

LISTE DES ETUDIANTS :

	N°	Matricule	Nom	Prénoms	Émargement
	01				
	02				
	03				
	04				
	05				
	06				
	07				
	08				
	09				
	10				
	11				
	12				
	13				
	14				
	15				
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				
	22				
	23				
	24				
	25				
	26				
	27				
	28				
	29				
	30				

SIGNATURE DE L'ENSEIGNANT

Avant-propos

Ce polycopié de cours de **Structure 2** est destiné principalement aux étudiants d'Architecture . Il a été élaboré dans le but de fournir un support pédagogique clair et synthétique permettant de mieux comprendre les principes fondamentaux du comportement des structures, ainsi que les techniques modernes de conception et de réalisation des ouvrages et des structures.

Face à l'évolution rapide des technologies de construction et aux exigences croissantes en matière de sécurité, de durabilité et de performance, l'architecte doit maîtriser non seulement les systèmes structuraux classiques, mais également les solutions innovantes adaptées aux contraintes géotechniques, sismiques et architecturales actuelles. Ce cours vise ainsi à développer chez l'étudiant les connaissances nécessaires à l'analyse, à la conception et au choix des systèmes porteurs les plus appropriés selon les conditions de projet.

Le contenu de ce polycopié est organisé en cinq chapitres complémentaires. Le premier et le deuxième chapitre sont consacrés à la géotechnique et aux fondations spéciales, en mettant l'accent sur les types des fondations profondes et les solutions de traitement des sols. Le troisième chapitre traite de la stabilité sismique des structures, des principes de conception parasismique ainsi que des exigences réglementaires du RPA et des Eurocodes. Le troisième chapitre présente les systèmes porteurs des bâtiments métalliques, leurs différentes configurations et leurs domaines d'application. Le quatrième chapitre est dédié aux structures des immeubles de grande hauteur (IGH), à leurs particularités constructives et aux recommandations réglementaires associées. Enfin, le cinquième chapitre aborde les structures mixtes acier-béton, qui constituent aujourd'hui une solution performante combinant les avantages mécaniques de l'acier et du béton.

Au-delà des aspects théoriques, ce document s'appuie sur de nombreux exemples pratiques, illustrations et schémas explicatifs afin de faciliter l'assimilation des concepts étudiés et de rapprocher les étudiants des réalités professionnelles du métier d'ingénieur.

L'objectif principal de ce cours est d'offrir aux étudiants un outil de travail efficace leur permettant d'acquérir les bases indispensables à la compréhension des systèmes structuraux

modernes et de préparer leur future pratique professionnelle dans le domaine de construction des structures.

Nous espérons que ce support contribuera à renforcer les compétences des étudiants et constituera une référence utile tout au long de leur parcours académique et professionnel.

.

L'auteur, BOUDINA. T

Table de matière

Avant-propos

Sommaire

CHAPITRE 1 : Introduction à Géotechnique

1. Introduction	3
2. Elément de mécanique des sols	3
2.1 Le sol	3
2.2 Paramètres de classifications des sols	3
3. Principales caractéristiques des sols	4
3.1 Introduction	4
3.2 Propriétés physiques	4
3.3 Propriétés mécaniques	7
3.4 Propriétés chimiques	8
4. Classification des sols	9
4.1 Introduction	9
4.2 Système de classification unifié des sols	9

CHAPITRE 2 : Les fondations spéciales

1. Introduction	14
2. Définition de Fondation	14
3 . La limite entre les différents types de fondations	14
4. Choix du type de fondations	15
4.1 Fondations superficielles	15
4.1.1 Les semelles isolées (sous poteaux)	15
4.1.2 Les semelles filantes (sous murs ou sous une file de poteaux) :	16
4.1.3 Le radier	16
2.2 Fondations Profondes	17
5. Différents types de fondations profondes	17
5.1 Les Puits	17
5.2 Les pieux	18
5.2.2 Pieux forés	19
5.3 Les parois moulées	20
5.3.1 Les principales phases de la réalisation d'une paroi moulée.	20
5.4 Les colonnes ballastées	23

CHAPITRE 3 : Stabilité des structures d'ouvrages vis-à-vis des efforts sismiques

1-Introduction	30
2. Elément d'étude de la sismologie	30
2.1- Foyer (Hypocentre)	30
2.2- Epicentre	30
2.3. Intensité	31
2.4. Magnitude	32
2.5. Séismogramme (sismomètre)	32
2.6 Les ondes sismiques (élastiques)	33
3. La Conception parasismique	37
4. Les règlements Parasismiques	37
4.1 Le règlement Parasismique Algérien (RPA 2024)	37
4.2 Les spécifications du (RPA 2024)	37
5. Le Séisme et les constructions en Béton Arme et en maçonnerie (Cas du séisme de Boumerdes 21-05-2003)	40
5.1 Investigation géotechnique	41
5.2 Les effets sur les constructions	41

CHAPITRE 4 : Système porteur des bâtiments métalliques

1. INTRODUCTION	48
2. Bâtiments industriels	48
2.1 La composition des batiments a portique en acier	48
2.2 Systèmes porteurs des bâtiments :	49
2.3 Systèmes porteurs des halles industrielles :	50
3. TYPES DE PORTIQUES	50
3.1 Portiques à âmes pleines	50
3.2. Portiques en treillis	51
4. SYSTEMES PORTEURS USUELS	51
4.1 Ossature articulée (Portique à pieds de poteaux articulés)	51
4.2 Systèmes porteurs des bâtiments	53
4.3 Ossatures en cadres rigides (Pieds de poteaux encastres)	53
4.4 Contreventement par portiques superposés	55
4.5 Ossatures à noyau central	56
5. LES SYSTEMES PORTEURS PARTICULIERS	59
5.1 Structures à treillis alternés	59
5.2 Bâtiments à portiques	61
5.3 Bâtiments ponts :	62
5.4 Structures en arc ou voûte :	62

CHAPITRE 5 : Construction Mixte

1. INTRODUCTION	66
2. Types des structures	66

2.1 Structures en Béton armé	66
2.2 Les Pierres	66
2.3 Structures en acier	67
2.4 Structures en Bois	67
2.5 Terre Crue	68
2.6 Roche/sculpture	68
2.7 Déchets	69
2.8 Matériaux Composites	70
3. DEFINITION DES STRUCTURES MIXTES	70
4. COMPLEMENTARITE ENTRE LE BETON ET L'ACIER	72
5. LES ELEMENTS STRUCTURAUX	73
5.1 Poteaux Mixtes	73
5.2 Poutres Mixtes	73
5.3 Dalles Mixtes	74
7. COMPARAISON D'ELEMENTS MIXTES ET EN BA	76

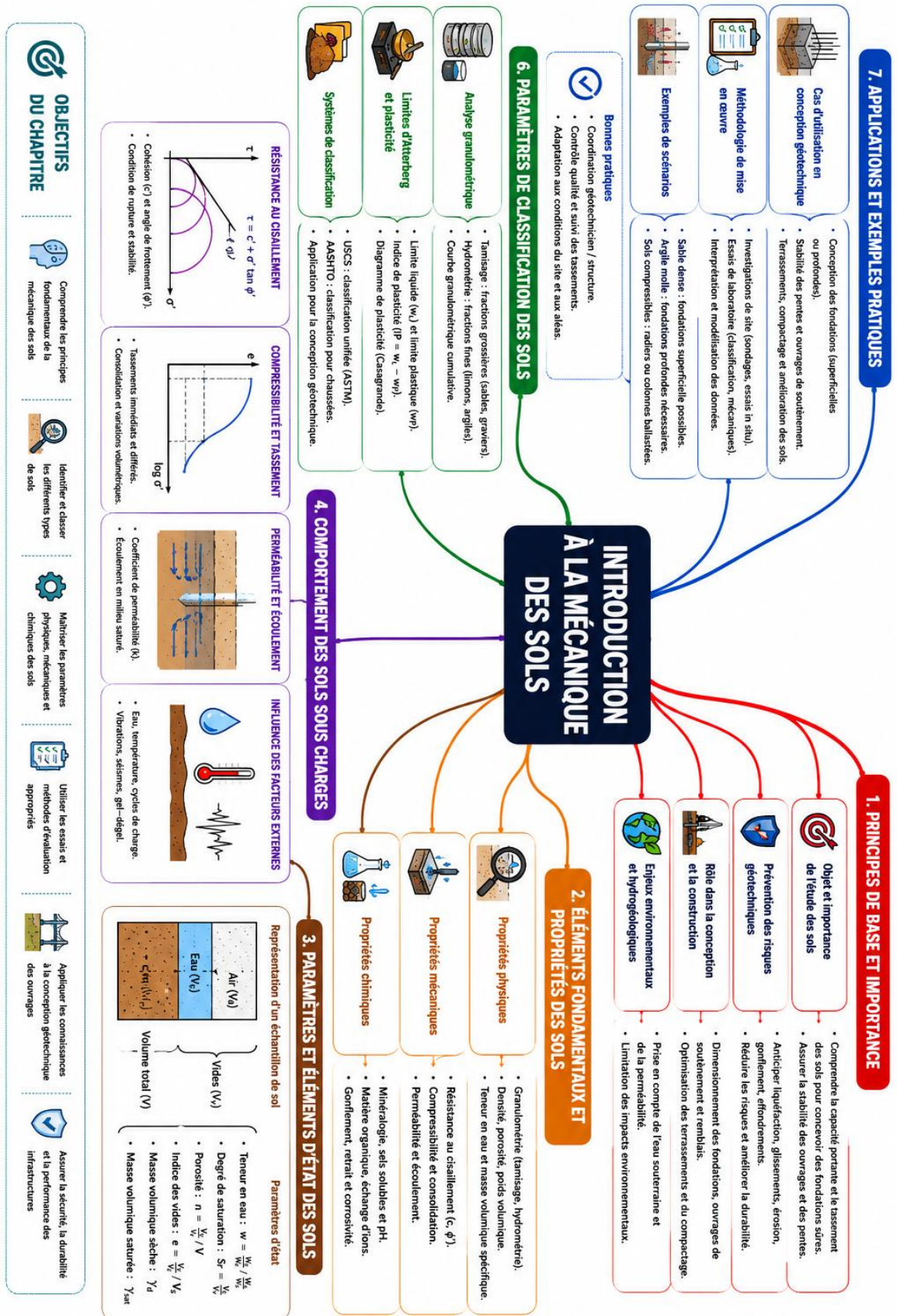
CHAPITRE 6 : Les structures des immeubles de grande hauteur (IGH)

1-Introduction	81
2. Classification des IGH :	82
3. Avantages et inconvénients des IGH :	83
3.1 Les Avantages :	83
3.2 Les Inconvénients :	84
4. Système constructif :	84
4.1 Système de contreventement par voile :	84
4.2 Système noyaux centrale:	85
4.3 Noyau central -ossature métallique :	86
4.4 Tube simple périphérique :	86
4.5 Tube dans le tube:	87
4.6 Tube et tube :	87
4.7 Exosquelette:	88
4.8 Tube monolithique:	89
4.9 Tube renforcé :	90
4.10 Grilles diagonales :	90
4.11 Résilles structurelles :	91
4.12 Résille spécifique :	92
5. Matériaux utilisé dans la construction :	92
5.1 Le béton :	92
5.2 L'acier :	93
6. Les principes fondamentaux de la sécurité :	94
7. Les IGH les plus connues du monde :	99
8. Etude de cas emblématique d'un IGH : Tour de foster (Normane foster)	101
8.1 Presentation de la tour :	101
8.2 Attributs constructifs et détails du projet :	102

Conclusion générale

Liste des références

Chapitre 1 : Introduction à Géotechnique



1. Introduction

La Géotechnique est une science pluridisciplinaire qui étudie les matériaux naturels se trouvant à la surface de la terre (sol et roche). C'est une science qui s'appuie fortement sur les pertinences des expériences et des observations qui permettent de définir les principes de base d'une modélisation adéquates des phénomènes.

La géotechnique nécessaire pour toute opération de construction au même titre que les autres ingénieries, elle se préoccupe de l'interface entre la construction de l'ouvrage à réaliser et le contexte géotechnique du site ou en veut l'implanter

La géotechnique est l'ensemble des activités liées aux applications de la mécanique des sols, de la mécanique des roches et de la géologie de l'ingénieur. La mécanique des sols étudie plus particulièrement le comportement des sols sous leurs aspects résistance et déformabilité.

A partir d'essais de laboratoires et in situ de plus en plus perfectionnés, la mécanique des sols fournit aux constructeurs les données nécessaires pour étudier les ouvrages de génie civil et de bâtiments et assurer leur stabilité en fonction des sols sur lesquels ils doivent être fondés, ou avec lesquels ils seront être construits après mise en service.

Les ouvrages utilisent le sol autant qu'un élément de l'infrastructure qui transmet la charge globale de l'ouvrage vers une couche du sol suffisamment stable et résistante. De ce fait, la réussite de l'ouvrage relève de la réussite du projet de fondation. Selon le type de l'ouvrage et son mode de conception, le sol peut constituer une base d'appuis pour l'ensemble de l'ouvrage tel que route, tunnel, barrage poids, mur de soutènement, aéroport, ou un point d'appuis pour quelques éléments seulement tel que bâtiment, pont, barrage ...etc.

A titre indicatif, la mécanique des sols traite les problèmes relatifs aux fondations diverses, ouvrages de soutènement, remblais et structures en terre, stabilité des pentes et talus, route, piste d'atterrissage, tunnels, mines...

2. Elément de mécanique des sols

2.1 Le sol

La terre est recouverte d'une couche plus ou moins solide de roches d'une épaisseur de 10 à 40 km. Au-dessus se trouve le sol. Il s'agit d'une mince couche d'épaisseur variable de matériaux non consolidés à cause des effets géologiques tels que les altérations qui provoquent la désintégration des roches en petites particules.

Le sol est un matériau naturel composé de trois phases –une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. la phase liquide et gazeuse constitue la phase des vides ou la phase des pores ; la phase solide est constituée de particules solides.

2.2 Paramètres de classifications des sols

Les ouvrages de génie civil liés au sol sont étudiés en tenant compte des paramètres physiques et mécaniques du sol. Ces paramètres sont généralement regroupés en 3 grandes familles.

a) *Nature du sol* : dimensions des grains - forme - granulométrie - minéralogie -matières organiques.

b) *État du sol* : poids et masse volumique du sol - degré de saturation - plasticité -compacité relative - indice des vides - porosité - indice de densité relative - indice de liquidité

c) *Comportement du sol* : coefficient de consolidation - indice de compressibilité - pression de consolidation - angle de friction interne - cohésion

3. Principales caractéristiques des sols

3.1 Introduction

Le sol est un matériau hétérogène et anisotrope comportant des minéraux et des matériaux organiques. La présence de l'air et de l'eau font du sol un matériau complexe à effet du temps. Son comportement est non linéaire et irréversible d'où la nécessité de combiner essais en laboratoire et en place, analyse théorique et modélisation, expérience cumulée et bon jugement pour la réussite d'une étude géotechnique.

3.2 Propriétés physiques

3.2.1 Paramètre d'état

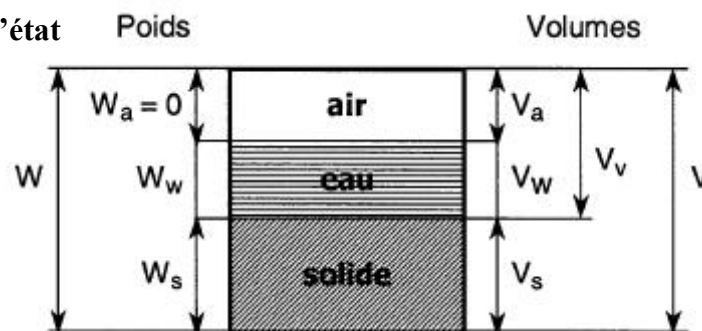


Fig. 1. 1 : Représentation conventionnelle d'un échantillon de sol.

Notations conventionnelles :

Poids

W (M) : poids total du sol

W_e (M_e) : poids de l'eau

W_s (M_s) : poids des grains

Volumes

V : volume total apparent

V_s : volume des particules solides

V_v : volume des vides entre les particules

V_a : volume de l'air

V_e : volume de l'eau

Avec les relations suivantes :

$$M = M_s + M_e$$

$$V = V_s + V_v = V_s + V_a + V_e$$

3.2.1.1 Masses volumiques (poids volumiques) (γ)

On appelle masse volumique apparente ou tout simplement masse volumique, le poids par unité de volume du sol considéré : $\gamma_h = \frac{M}{V}$

- ✓ Le poids (masse) volumique sec est le poids de la matière sèche contenu dans l'unité de volume : $\gamma_d = \frac{M_s}{V}$
- ✓ Le poids (masse) volumique de l'eau : $\gamma_e = \frac{M_w}{V_w}$
- ✓ Le poids (masse) volumique des grains solides : $\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$
- ✓ Le poids (masse) volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} = \frac{M}{V}$
- ✓ Le poids (masse) volumique du sol déjaugé : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_e$

3.2.1.2 La porosité (n)

Permet de connaître l'importance des vides dans un état lâche ou serré. Elle est définie comme étant le rapport du volume des vides au le volume total de l'échantillon. $n = \frac{V_V}{V}$

3.2.1.3 L'indice des vides (e)

Le rapport du volume des vides au volume des grains solide $e = \frac{V_V}{V_s}$

3.2.1.4 La teneur en eau (w)

Définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol. Elle s'exprime en *pour-cent*. Elle est facilement mesurable en laboratoire. $w = \frac{M_e}{M_s} * 100$

3.2.1.5 Le degré de saturation (Sr)

Indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides. Il s'exprime en *pour-cent* $S_r = \frac{V_w}{V_V} * 100$

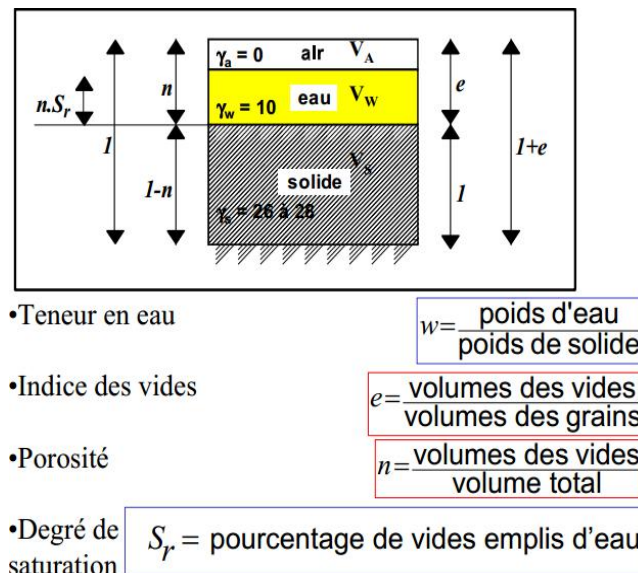


Fig. 1. 2 : Paramètre d'état des sols

3.2.2 Analyse granulométrique

C'est l'étude au laboratoire de la répartition des grains d'un sol selon leurs dimensions. L'essai se fait en suivant un mode opératoire bien précis. Pour les sols grossiers, on effectue un tamisage tandis que pour les particules très fines l'essai se fait par sédimentométrie.

En général, l'interprétation des résultats se fait en dressant la courbe du tamisat cumulé en fonction du diamètre des grains (Fig. 3).

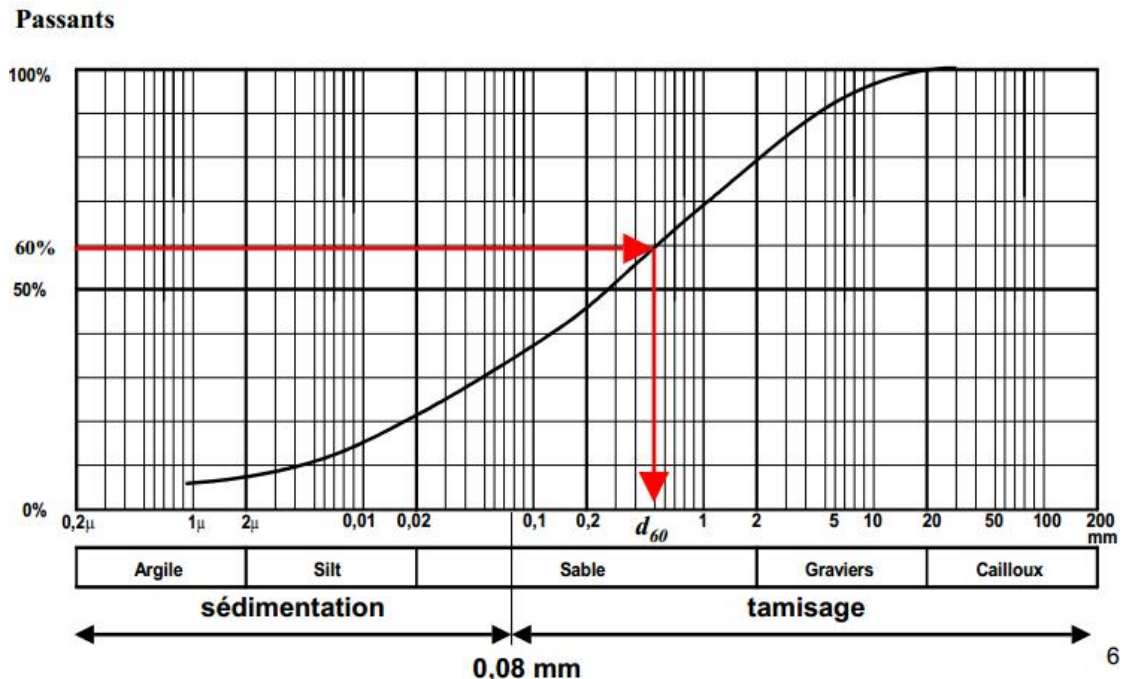


Fig. 1.3 : Exemples des grains

3.2.3 Les limites et indices de consistance (Atterberg)

La présence d'eau dans le sol, particulièrement pour le cas des sols fins, affecte leurs consistances ; afin de pouvoir apprécier le comportement probable d'un sol fin, il est important de définir des teneurs en eau à certaines étapes limites ou critique de comportements.

Les argiles forment des pâtes dans lesquelles chaque grain est relié aux grains voisins par des forces de cohésion dues à la présence des couches adsorbées. La consistance qui en résulte dépend en grande partie de la teneur en eau du matériau.

Atterberg (1911) a défini six limites de consistance pour les sols fins. Terzaghi et Casagrande (1932) ont standardisé trois limites d'Atterberg qui sont utilisées pour la classification des sols fins. Les limites d'Atterberg utilisées en géotechnique sont : limite de liquidité, limite de plasticité et limite de retrait (Fig. 4).

A l'état plastique, les grains sont plus rapprochés et ont mis en commun leurs couches d'eau adsorbées. Lorsqu'il y a mouvement, les grains restent attachés les uns aux autres sans s'éloigner. A l'état solide, les distances inter-granulaires sont encore plus petites. Les grains

arrivent même au contact en quelques points chassant ainsi l'eau adsorbée. Les frottements internes sont alors importants. La transition d'un état à l'autre est très progressive.

- ❖ **Limite de liquidité (W_L)** : sépare l'état liquide de l'état plastique.
- ❖ **Limite de plasticité W_P** : sépare l'état plastique de l'état solide.
- ❖ **Limite de retrait W_R** : caractérise l'apparition du phénomène de retrait.

NB : Ces limites sont mesurées sur le mortier, c.à.d. la fraction de sol qui passe le tamis d'ouverture égale à 0,40 mm.

Indice de plasticité I_P : mesure l'étendu du domaine de plasticité du sol. $I_P = W_L - W_P$

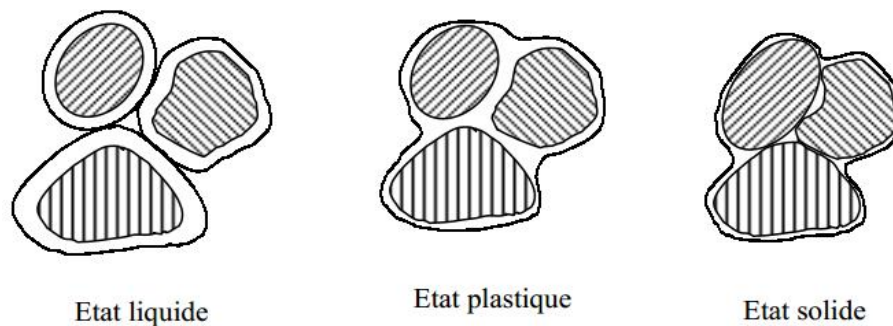


Fig. 1. 4: Etats de consistance d'un sol

3.3 Propriétés mécaniques

Un programme de reconnaissance géotechnique doit être réalisé au site de la future construction afin d'obtenir les données requises pour l'analyse de la capacité portante. Les méthodes d'analyse de la capacité portante des fondations superficielles ou profondes et des ouvrages de soutènement font. Les paramètres caractéristiques des propriétés mécaniques des sols sont présentés comme suit :

3.3.1 Analyse des contraintes - Cercle de Mohr

La représentation de Mohr est une représentation plane du tenseur des contraintes dans des axes liés à la facette

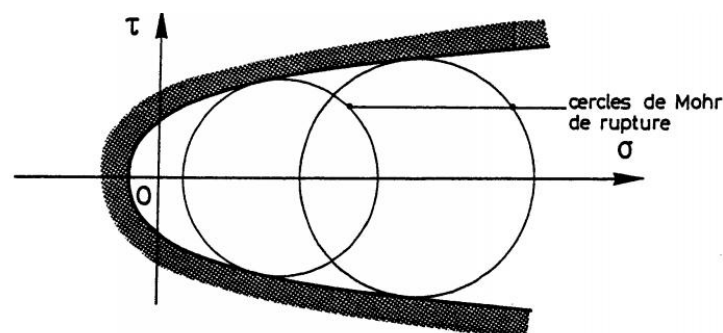


Fig. 1. 5 : Cercles de Mohr

3.4 Propriétés chimiques

Les propriétés physiques des couches adsorbées dépendent aussi de la nature du minéral qui constitue le grain. L'étude des couches adsorbées et des minéraux argileux est importante pour bien comprendre le comportement des argiles que la granulométrie seule ne saurait expliquer. C'est ainsi que nous classons les minéraux argileux en différents groupes : famille, espèce et variété. Les trois familles les plus connues sont la kaolinite, la montmorillonite et l'illite.

3.4.1 La kaolinite

Les argiles de la famille de la kaolinite sont les constituants essentiels de la plus part des argiles utilisées en céramique. Leur surface spécifique ne dépasse pas 20 à 30 m²/mg. Les phénomènes de surface sont donc peu intenses. Autrement dit, ces minéraux sont relativement inactifs. La formule chimique de cette famille est du type $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ pour une demi-maille, elle est donc assez riche en alumine.

3.4.2 La montmorillonite

Les sols de la famille de la montmorillonite peuvent absorber de l'eau dans des proportions considérables, donnant lieu à des gonflements caractéristiques. Ceci est dû au fait que les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles à cause de la structure floconneuse, et l'eau pénètre facilement entre les feuillets. D'autre part, la surface spécifique de cette famille est élevée, elle peut dépasser 150 m²/g, ce qui donne une grande importance aux phénomènes de surface. La montmorillonite est alors une famille de minéraux argileux actifs.

3.4.3 L'illite

Les argiles de la famille de l'illite sont parmi les minéraux les plus répandus à la surface de la terre. La structure de l'illite est analogue à celle des micas, mais la matière est beaucoup plus finement divisée. La formule chimique pour une demi-maille de l'illite est de la forme $\text{Si}_{(4-x)}\text{Al}_x\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_{2x}\text{K}$.

4. Classification des sols

4.1 Introduction

La classification des sols est un moyen de créer des catégories de sol permettant de prédire leurs comportements. En général, le simple examen visuel permet de donner un nom au matériau : marne bleu, argile jaune, sable fin,...Il faut toutefois compléter cette indication par

- ✓ Une analyse granulométrique
- ✓ Détermination des limites d'Atterberg.
- ✓ Teneur en eau, masse volumique.
- ✓ Indice de densité pour les sols pulvérulents.
- ✓ Résistance à la compression simple pour les sols cohérents.

Ces renseignements permettent à l'ingénieur d'identifier les sols et par conséquent de se faire une idée sur leurs comportements. Il existe plusieurs systèmes de classification des sols. Leur inconvénient est qu'ils ne sont pas applicables dans tous les cas des applications.

4.2 Système de classification unifié des sols

Les résultats des essais permettent à identifier les sols et par conséquent de se faire une idée sur leurs comportements. Il existe plusieurs systèmes de classification des sols. Leur inconvénient est qu'ils ne sont pas applicables dans tous les cas des applications.

Deux systèmes de classification des sols sont couramment utilisés en génie civil ; le système USCS « *Unified Soil Classification System* » et le second est le system AASHTO « *American Association of State Highway and Transportation Officials* »

4.3.1 Système USCS

Il a été conçu en 1952 par le professeur Casagrande, le bureau de réclamation (U.S) et le corps des ingénieurs (armée U.S). Il est applicable: aux projets de fondation, aux barrages ainsi qu'aux pistes d'atterrissage et autres types d'ouvrages. Le principe de base de l'USCS consiste à :

- . Classer les sols à gros grains (sables et graviers) d'après leurs granulométries.
- . Classer les sols à grains fins (silts et argiles) d'après leurs comportements plastiques.

Composante de sol			Symbole	Grosseur [mm]
Blocs			aucun	> 300
Cailloux			aucun	[300 – 75]
Sols à grains grossiers	Gravier	Grossier	G	[75 – 19]
		Fin		[19 – 4,75]
	Sables	Grossier	S	[4,75 – 2,0]
		Moyen		[2,0 – 0,425]
		Fin		[0,425 – 0,075]
	Sols à grains fins	Silts		M
Argiles		C	< 0,075	
Sols organiques			O	sans

Tab. 1. 1 Classification USCS des sols d'après la grosseur des grains

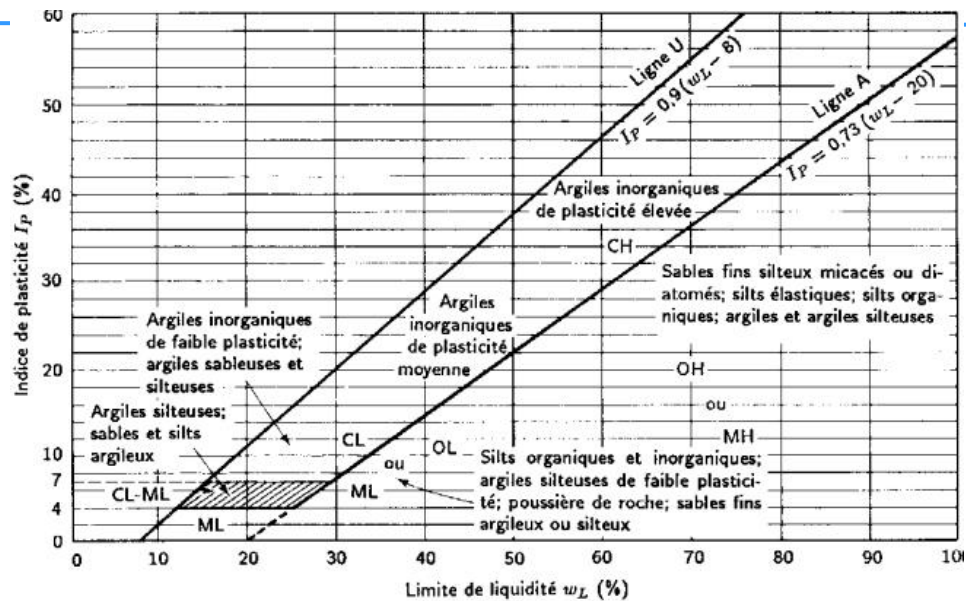


Fig. 1. 6: Abaque de plasticité de Casagrande et position de différents types de sols

Catégorie			Symbole	Description	Identification sur terrain (fraction à grosseur < 75 mm)		
Sols à grains grossiers (+ 50 % est retenue sur tamis 200)	Graviers (+ 50 % de la fraction grossière est retenue sur tamis 4)	gravier propre avec peu ou pas de particules fines	GW	Gravier bien étalés, mélange graviers-sables, peu ou pas de particules fines	Gamme granulométrique étendue, nombre élevé de grains de grosseurs intermédiaires		
			GP	Graviers uniformes, mélange graviers-sables, peu ou pas de particules fines	Grosseur prédominante ou gamme granulométrique étendue mais faible représentation de certaines grosseurs intermédiaires		
		gravier contenant beaucoup de particules fines	GM	Graviers silteux, mélange gravier-sable-silt	Particules fines non plastiques ou de faible plasticité		
			GC	Graviers argileux, mélange gravier-sable-argile	Particules fines plastiques		
	Sables (+ 50 % de la fraction grossière passe le tamis 4)	sable propre avec peu ou pas de particules fines	SW	Sables bien étalés, sables graveleux, peu ou pas de particules fines	Gamme granulométrique étendue, nombre élevé de grains de grosseurs intermédiaires		
			SP	Sables uniformes, peu ou pas de particules fines	Grosseur prédominante ou gamme granulométrique étendue mais faible représentation de certaines grosseurs intermédiaires		
		sable contenant beaucoup de particules fines	SM	Sables silteux, mélange sable-silt	Particules fines non plastiques ou de faible plasticité		
			SC	Sables argileux, mélange sable-argile	Particules fines plastiques		
					Identification de la fraction passant le tamis n° 40		
					Résistance au broyage à sec	Résistance aux vibrations	Ténacité
Sols à grains fins (+ 50 % passe le tamis 200)	Silts et Argiles ($W_L < 50\%$)	ML	Silts inorganiques et sables très fins, poussière de roche, sables fins silteux ou argileux, silts argileux peu plastiques	Aucune à légère	Rapide à lente	Aucune	
		CL	Argiles inorganiques de plasticité faible à moyenne, argile graveleuse, argiles sableuses, argiles silteuses	Moyenne à élevée	Aucune à très lente	Moyenne	
		OL	Silts organiques et argiles silteuses organiques de faible plasticité	Légère à moyenne	Lente	Légère	
	Silts et Argiles ($W_L > 50\%$)	MH	Silts inorganiques, sables fins micacés ou diatomés	Légère à moyenne	Lente à aucune	Légère à moyenne	
		CH	Argiles inorganiques de plasticité élevée, argiles grasses	Elevée à très élevée	Aucune	Elevée	
		OH	Argiles organiques de plasticité moyenne à élevée, silts organiques	Moyenne à élevée	Aucune à très lente	Légère à moyenne	
	Sols fortement organiques		Pt	Tourbes et autres sols fortement organiques	D'après couleur, odeur, teneur en eau, structure fibreuse		

Tab. 1. 2.: Classification USCS des sols (d'après Robert D.H., William D.K.)

Conclusion

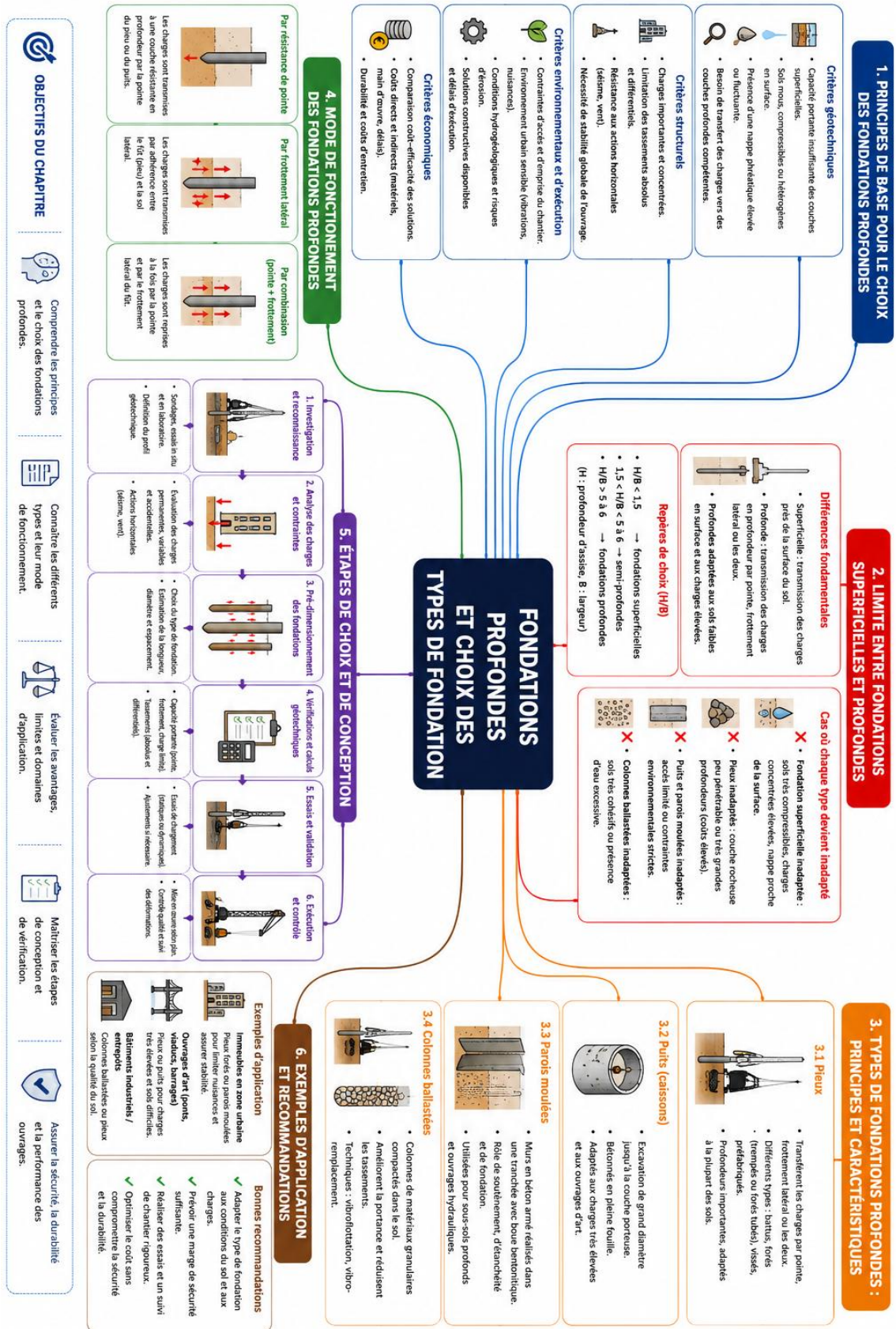
L'introduction à la géotechnique met en évidence l'importance fondamentale du sol dans la conception et la réalisation des ouvrages de génie civil. En tant que support naturel des constructions, le sol influence directement la stabilité, la sécurité et la durabilité des structures. La géotechnique, à travers la mécanique des sols, la mécanique des roches et la géologie de l'ingénieur, fournit les connaissances et les outils nécessaires pour comprendre le comportement des terrains et adapter les projets aux conditions géologiques du site.

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié la nature des sols, leur composition ainsi que les principaux paramètres physiques, mécaniques et chimiques qui conditionnent leur comportement. Les notions de masse volumique, porosité, indice des vides, teneur en eau et degré de saturation permettent de caractériser l'état d'un sol, tandis que les analyses granulométriques et les limites d'Atterberg contribuent à son identification et à sa classification.

L'étude des propriétés mécaniques a également montré l'importance de la résistance au cisaillement, de la compressibilité et des contraintes internes dans le dimensionnement des fondations et des ouvrages géotechniques. Par ailleurs, les propriétés chimiques et minéralogiques des sols, notamment celles des argiles, jouent un rôle déterminant dans les phénomènes de gonflement, de retrait et de stabilité à long terme.

Enfin, les différents systèmes de classification, tels que l'USCS et l'AASHTO, constituent des outils essentiels permettant à l'ingénieur de prévoir le comportement des sols et de choisir les solutions techniques les plus appropriées. Ainsi, la connaissance approfondie des caractéristiques des sols constitue une étape indispensable à la réussite de tout projet de construction. Une étude géotechnique rigoureuse permet non seulement d'assurer la sécurité des ouvrages, mais également d'optimiser les choix de fondation et de réduire les risques techniques et économiques liés aux conditions du terrain. Dans ce contexte, la géotechnique occupe une place centrale dans le processus de conception et demeure un domaine incontournable pour le développement d'infrastructures fiables, durables et adaptées aux exigences de l'ingénierie moderne.

Chapitre 2 : Les fondations spéciales



1. Introduction

La détermination des dimensions des structures des bâtiments a pour objet la conservation d'un état d'équilibre stable. Comme tout solide, les constructions obéissent aux lois générales de l'équilibre. L'ensemble construction-sol d'assise doit permettre d'écrire que la somme des forces suivant les deux axes principaux est égale à 0, ainsi que la somme des moments.

La fondation doit, dans ce cadre, assurer l'équilibre entre la pression engendrée par la sollicitation (descente de charge de la construction) et la résistance du sol (contrainte admissible).

2. Définition de Fondation

- **Fondation** : partie d'un ouvrage reposant sur un terrain d'assise auquel sont transmises toutes les charges permanentes et variables supportées par cet ouvrage.

- **Fondation superficielle** : lorsque les efforts sont reportés à la surface du sol.

- **Fondation profonde** : lorsque les efforts sont reportés en profondeur.

3 . La limite entre les différents types de fondations

Cette limite dépend du rapport H/B (tel que B : largeur de la fondation et H profondeur d'assise) et varie suivant les auteurs. En général, cette limite est fixée à 5 ou 6.

Entre les fondations superficielle et profonde, il existe les fondations semi-profondes.

En général :

Si $H/B < 1,5$	la fondation est dite superficielle.
Si $1,5 < H/B < 5$ à 6	la fondation est dite semi-profonde.
Si $H/B > 5$ à 6	la fondation est dite profonde.

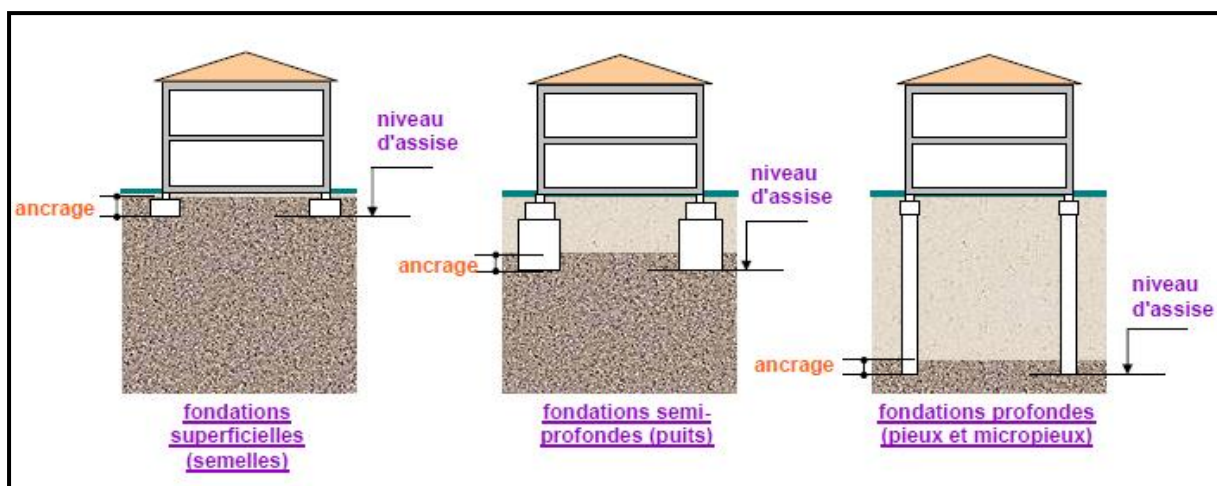


Fig. 2. 1: Différents types de fondations.

4. Choix du type de fondations

Le choix du type des fondations dépend essentiellement, des facteurs suivants :

- ✓ La capacité portante du sol.
- ✓ Les Charges transmises au sol.
- ✓ La distance entre axes des éléments verticaux.

La capacité portante reste le facteur pilote du choix de type de fondation ,elle permet de choisir le type de fondations à employer. Si le sol est suffisamment portant, on utilisera des fondations superficielles souvent plus économiques. Si le sol est mauvais, on ira s'appuyer sur les couches meilleures et plus profondes avec des fondations profondes.

4.1 Fondations superficielles

Elles reposent sur le sol ou qui n'y sont que faiblement encastrées. Les charges qu'elles transmettent ne sollicitent que les couche superficielles ou peu profondes. On distingue trois types de fondations superficielles :

4.1.1 Les semelles isolées (sous poteaux)

Généralement de formes carrée ($B \times B$), rectangulaire ($B \times L$) ou circulaire de diamètre B . dans tous les cas, les dimensions B et L sont au plus de quelques mètres.

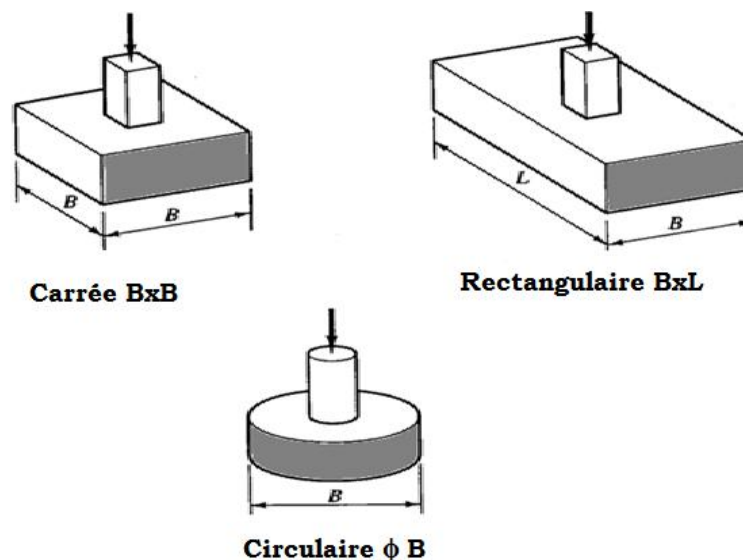


Fig. 2. 2 : Différentes formes de semelles isolées.

4.1.2 Les semelles filantes (sous murs ou sous une file de poteaux) :

Lorsque des semelles ont les dimensions telles qu'elles se touchent presque dans un sens, il est avantageux de les relier d'une manière à former une semelle filante (continue).

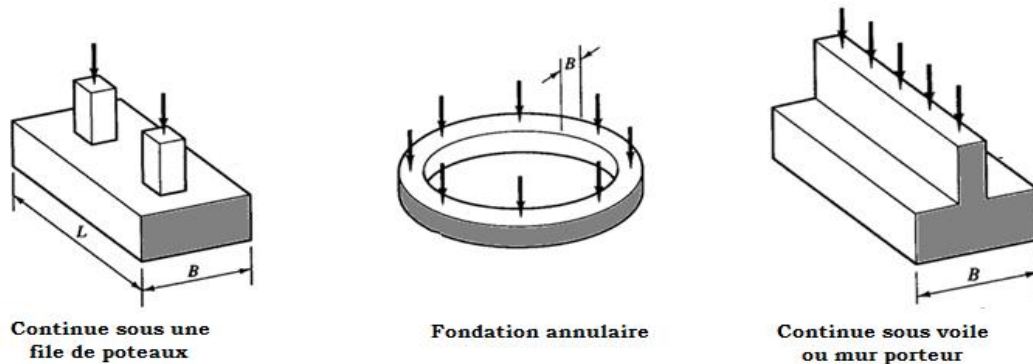


Fig. 2. 3 : Différentes formes de semelles filantes.

4.1.3 Le radier

Souvent appelé radier général, de dimensions B et L importantes ($B \times L \geq$ à l'aire de l'ouvrage porté). C'est une sorte de plancher renversé recevant la contrainte unitaire du sol et reposant sur les points d'appui de la construction.

Il peut être constitué par une simple dalle épaisse ou par des poutres longitudinales et transversales, liants les porteurs, soutenant une dalle plus mince.



Fig. 2. 4: Ferraillage de fondation type radier.

2.2 Fondations Profondes

Elles permettent de reporter les charges sur des couches situées depuis la surface jusqu'à une profondeur de capacité portante acceptable, lorsque le sol en surface n'a pas une résistance suffisante pour supporter ces charges par l'intermédiaire de fondations superficielles.

Le mode de fonctionnement peut être :

- Par appui direct sur la couche portante (résistance de pointe)
- Par appui latéral sur la couche portante (résistance par frottement latéral)
- Ou par combinaison des deux (résistance de pointe et par frottement latéral)

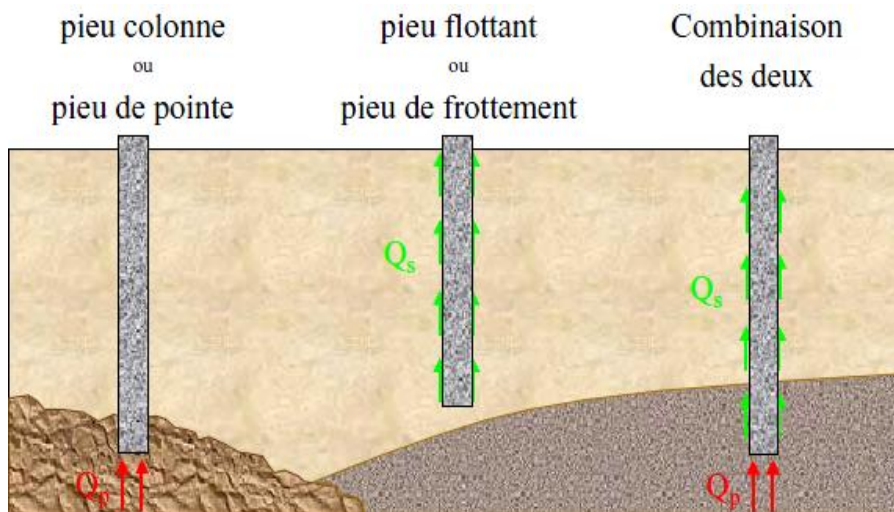


Fig. 2. 5: Mode de travail d'une fondation profonde.

5. Différents types de fondations profondes

Le groupe des fondations profondes recouvre une grande variété de techniques qu'il serait impossible de parcourir dans le cadre de ce cours. Nous avons donc choisi de traiter de 5 techniques qui nous semblent suffisamment courantes et qui permettent une approche de ce vaste domaine. On abordera donc les puits, les pieux, les micro-pieux, les parois moulées et, pour finir, les colonnes ballastées qui se trouvent à la marge des techniques de fondations et de traitement de sol.

5.1 Les Puits

Ils s'agissent de la technique la plus ancienne de fondation profonde. Autrefois, la réalisation des puits était sur des profondeurs n'excédant pas 5 m. Ils se placent en limite des deux domaines de fondations. Ils se rattachent, par le principe de réalisation, aux fondations profondes, mais sont généralement calculés suivants les règles des fondations superficielles. Ils sont bétonnés pleine fouille et ne comportent en général pas d'armature.



Fig. 2. 6 : La mise en œuvre d'un puits

Eléments techniques concernant les puits :

- ✓ La surface d'appui varie en général de 60 x 120 à 120 x 140.
- ✓ Ils sont bien adaptés à des descentes de charges ponctuelles (poteaux, portiques...)
- ✓ Le curage du fond de fouille est très difficile : Il y a là un risque de tassement par interposition d'une zone de matériaux décomprimés sous l'assise.
- ✓ Le mode de bétonnage "pleine fouille" amène dans les cas difficiles des problèmes induits par l'apparition d'un frottement négatif sur le fût.
- ✓ La technique du puits est fréquemment employée, notamment dans le cadre de chantiers de faible à moyenne envergure.

5.2 Les pieux

Le pieu est la réponse technique à l'éloignement en profondeur du sol porteur. Au-delà d'une certaine profondeur, les moyens mécaniques classiques ne sont plus opérants et il faut utiliser du matériel spécifique. La technique de pieux est plus adaptée que la technique puits à des chantiers d'envergure moins importante. La mise en œuvre est plus facilement adaptable à des conditions variées, et, enfin, la technique de pieux autorise, dans de nombreux cas, l'utilisation des forces de frottement latéral. Le principe est de concentrer les charges sur des points singuliers, où l'on met en œuvre des ouvrages spéciaux, et de les transmettre vers le sol d'assise de bonne résistance. On note que la trame d'infrastructure doit être en accord avec l'organisation de l'ossature en élévation, afin que les points de descente de charges coïncident avec les lieux d'implantation des pieux. Dans ce cadre, c'est essentiellement la technologie de mise en œuvre qui détermine les différentes catégories de pieux et leur mode de fonctionnement.

5.2.1 Classification des pieux

Traditionnellement, on classe les pieux :

1. Soit suivant la nature du matériau constitutif : bois, métal, béton ;
 2. Soit suivant le mode d'introduction dans le sol
- ✓ Pieux battus, façonnés à l'avance et mis en place, le plus souvent, par battage,
 - ✓ Pieux forés, exécutés en place par bétonnage dans un forage,
- En Algérie on utilise généralement les pieux forés

5.2.2 Pieux forés

Ce sont des ouvrages mis en place à l'intérieur d'un trou réalisé préalablement par technique de forage. La technique de forage constitue la partie la plus spectaculaire de la phase de réalisation des pieux. Les machines utilisables sont multiples et varient suivant le terrain à perforer. Les plus employées sont, soit des tarières (destinées aux sols relativement tendres), soit des machines à roto percussion (destinées aux terrains rocheux).

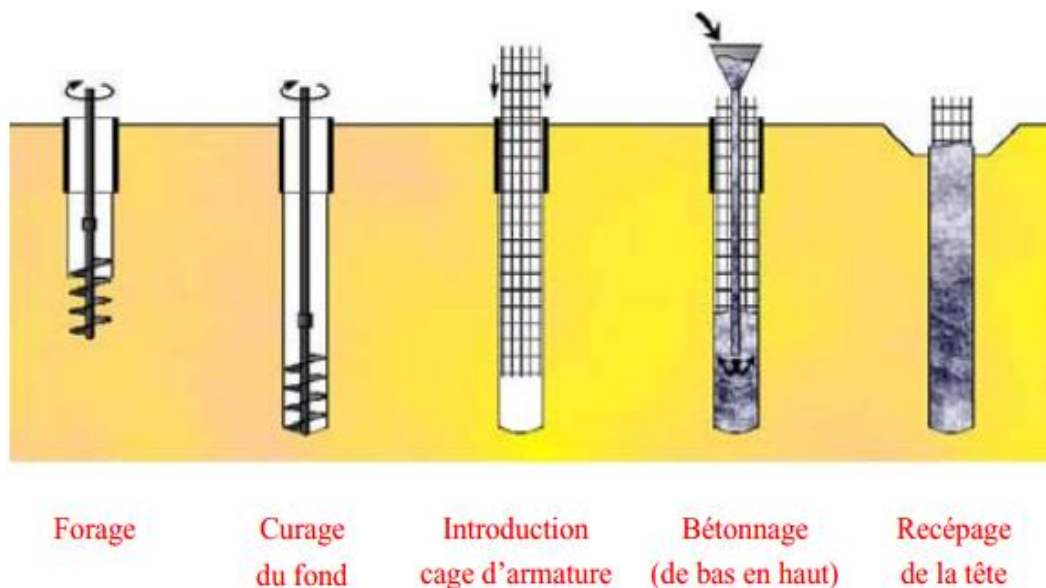


Fig. 2. 7: Exécution des Pieux forés



Fig. 2. 8: La tarière creuse



Fig. 2. 9: Pieu Maritime



Fig. 2. 10: Ferrailage de pieux avant Bétonnage.

5.3 Les parois moulées

La conception d'un mur en paroi doit se faire dans le cadre des trois fonctions principales : le soutènement, l'étanchéité et la fondation profonde. On peut concevoir une paroi moulée en tant que mur de soutènement, en dégarnissant une des faces de la paroi, l'autre face étant soumise aux poussées du sol. En cas d'insuffisance de la fiche pour reprendre les efforts de butée, on ancre la paroi par des tirants disposés en lits à plusieurs niveaux.

Les panneaux ou les parois ont couramment une épaisseur de 0,5 à 1,5 m, une longueur de 8 à 10 m et une hauteur entre 10 à 20 m, bien qu'il existe des valeurs exceptionnellement atteintes dans certains projets, comme c'est le cas du barrage de Villita au Mexique, où la hauteur des parois a atteint 90 m.

5.3.1 Les principales phases de la réalisation d'une paroi moulée.

- Exécution d'une avant-tranchée de faible profondeur.



Fig. 2. 11 : Exécution d'une avant tranchée.

- Exécution de murets- guides.



Fig. 2. 12: Exécution de murets-guides.

- Excavation de la tranchée au moyen d'une benne preneuse.

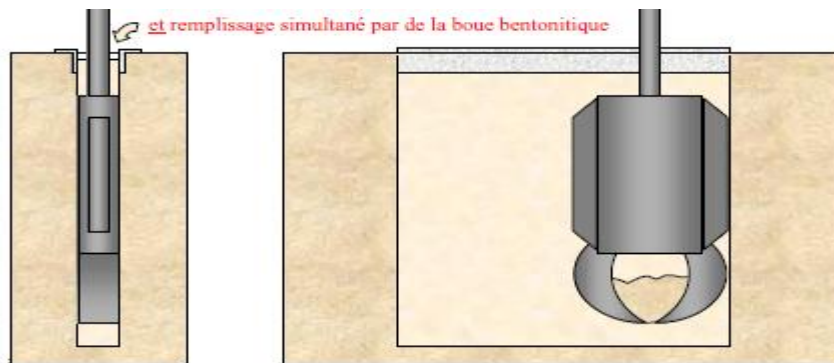


Fig. 2. 13: Excavation de la tranchée.

Lors de l'excavation, les parois sont maintenues par une boue qui remplit la tranchée. C'est de la bentonite qui possède la propriété de thixotropie soit d'être à l'état liquide lorsqu'elle est agitée et à l'état solide au repos. Grâce à sa densité, elle permet de retenir les parois de la tranchée et d'éviter les infiltrations d'eau, et d'autre part en créant une fine pellicule (3 à 5 mm), appelée cake, contre les parois et en pénétrant dans les interstices du sol ce qui a pour résultat de lier les particules du terrain entre elles et donc de le consolider, ces pénétrations s'appellent des dendrites et ont de quelques centimètres à plusieurs mètres de longueur (fig.15)

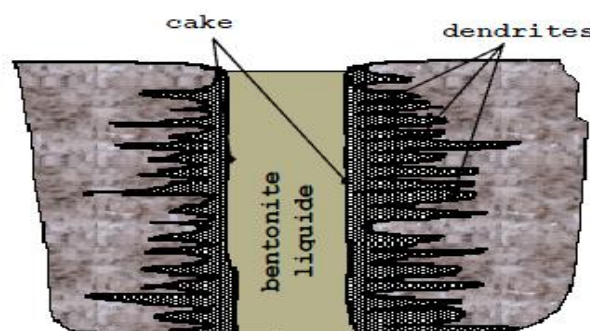


Fig. 2. 14: Rôle de la boue dans la tranchée.

- Mise en place (éventuelle) de tubes joints.

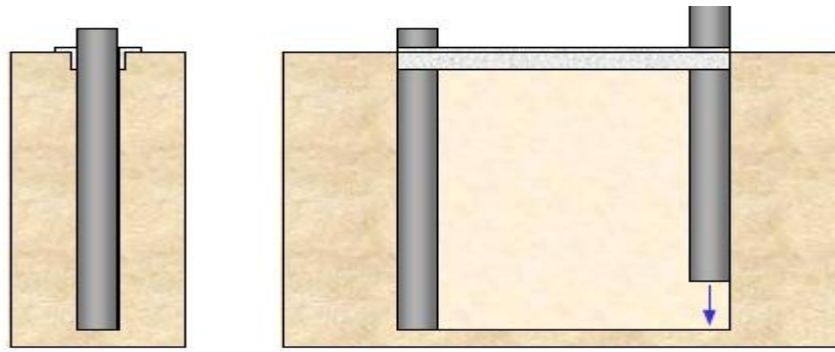


Fig. 2. 15: Mise en place de tubes joints.

- Mise en place de la cage d'armatures.

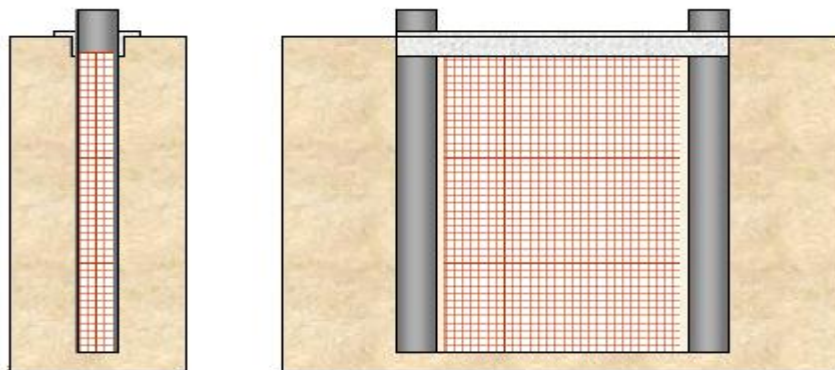


Fig. 2. 16: Mise en place des armatures.

- Bétonnage du panneau au tube plongeur.

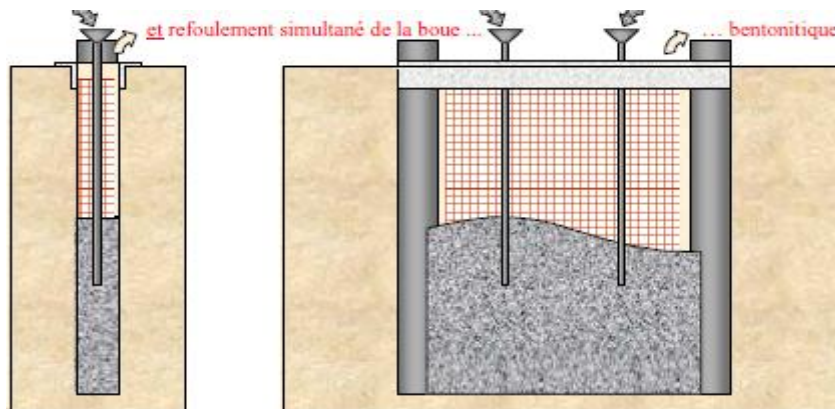


Fig. 2. 17: Bétonnage de la paroi.

- Arrachement des (éventuels) tubes joints.

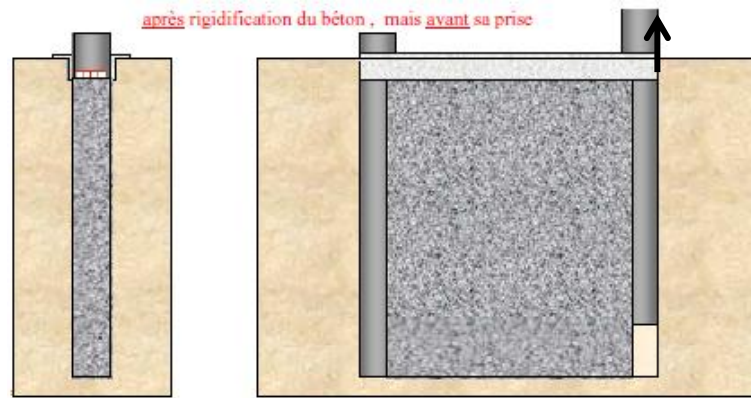


Fig. 2. 18: Arrachement des tubes joints.

5.4 Les colonnes ballastées

C'est une méthode qui sert à renforcer et à améliorer les sols très faibles à médiocres (sables limoneux, limons, limons argileux, argiles). Les colonnes ballastées dont les premières utilisations remontent à plus de 40 ans, connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt alors même que sont apparues un grand nombre de nouvelles techniques de renforcement et d'amélioration des sols.

Elles sont constituées par des fûts (diamètre de 0,50 à 1,20 m) remplis par des matériaux pulvérulents (ballast) compacté dans le sol à l'aide d'un vibreur radial placé à la pointe d'un tube qui sert de support. Ces techniques consistent à réaliser des inclusions verticales souples, semi-rigides ou rigides dans un terrain compressible. Les inclusions sont disposées suivant un maillage de surface régulier.

Les matériaux apportés sont naturellement de bonne qualité, le plus souvent de matière sèche et pulvérulente. De cette façon la couche de sol renforcée se comporte comme un matériau composite de meilleures caractéristiques.

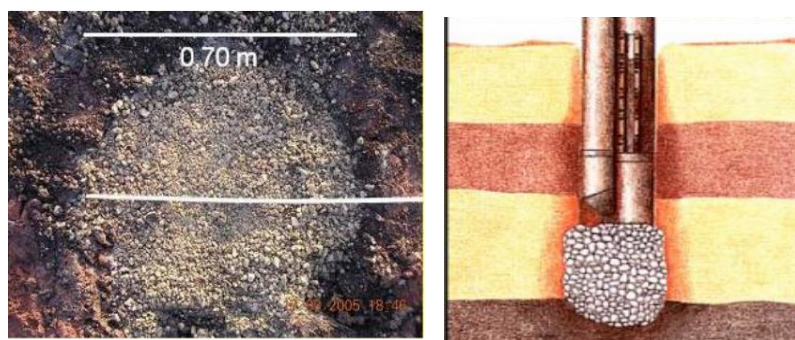


Fig. 2. 19 : Coupe d'une colonne ballastée

5.4.1 Mode opératoire

a- Préparation : La machine mise en station au-dessus du point de fonçage, est stabilisée sur ses vérins. Le vibreur est amené à la verticale du point central du fonçage préalablement implanté.

b .Remplissage : Le contenu de la benne est vidé dans le sas. Après sa fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie.

c. Fonçage : Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à la poussée sur l'outil.

d. Compactage : Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé. Puis le vibreur descend pour compacter le matériau

e. Finition : La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu. Les semelles de fondations sont alors réalisées de manière traditionnelle.

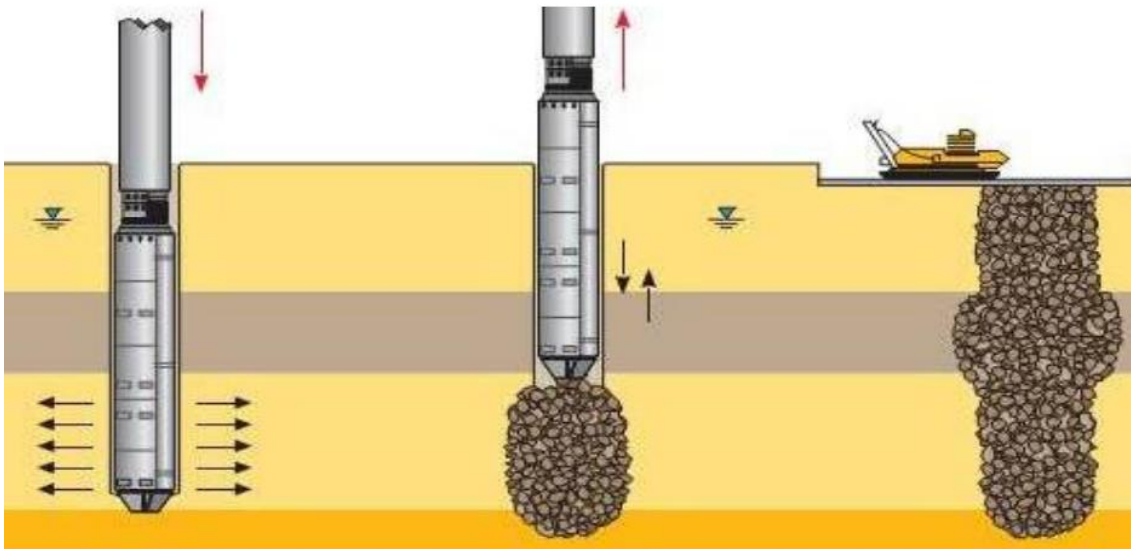


Fig. 2. 20: Fonçage, compactage et finition

Ce renforcement de sol par colonnes ballastées permettra donc de :

- ✓ Garantir à 100 % l'absence de risque de liquéfaction par augmentation sensible de la résistance au cisaillement ;
- ✓ Augmenter la capacité portante du sol ; De diminuer les tassements totaux et différentiels ;

- ✓ Diminuer le temps de consolidation ;
- ✓ Économiser un montant très important en comparaison avec d'autres méthodes de renforcement ;
- ✓ Réduire le délai d'exécution des trois blocs.

- ❖ Le sol renforcé se comporte comme un matériau composite et agit comme un élément porteur et un drain vertical.

Conclusion

Les fondations constituent un élément essentiel de tout ouvrage de génie civil, puisqu'elles assurent la transmission des charges de la structure vers le sol tout en garantissant sa stabilité et sa sécurité. Le choix d'un système de fondation approprié dépend principalement de la nature du terrain, de sa capacité portante, de l'importance des charges à transmettre ainsi que des contraintes techniques et économiques du projet.

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les différents types de fondations, depuis les fondations superficielles, adaptées aux terrains suffisamment résistants, jusqu'aux fondations profondes destinées à reporter les charges vers des couches plus compétentes situées en profondeur. Les semelles isolées, les semelles filantes et les radiers représentent les solutions les plus courantes pour les fondations superficielles, tandis que les puits, les pieux, les parois moulées et les colonnes ballastées constituent des techniques performantes pour les fondations profondes et l'amélioration des sols.

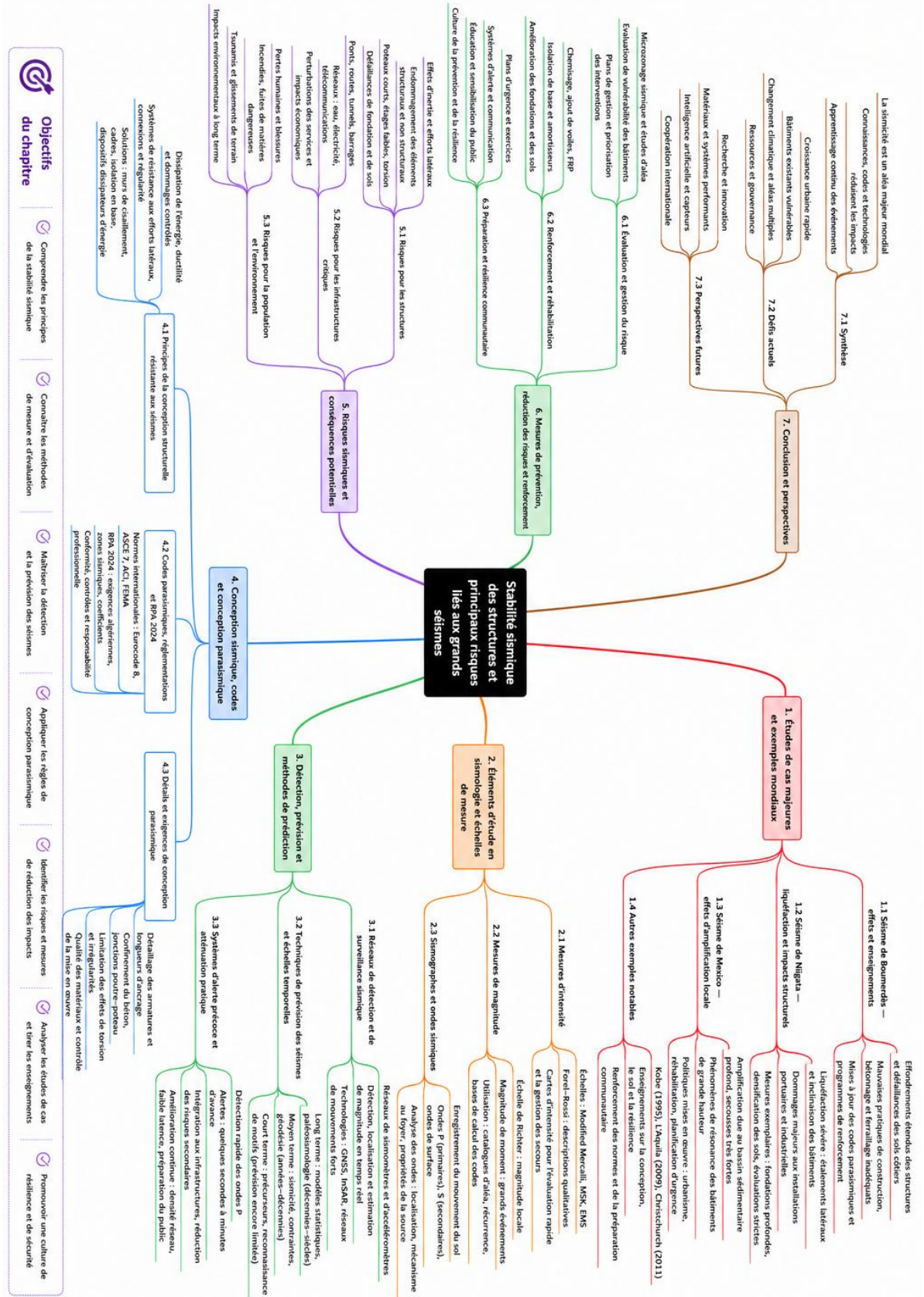
L'analyse des modes de fonctionnement des fondations profondes a montré l'importance de la résistance de pointe et du frottement latéral dans la reprise des efforts transmis par la structure. Les techniques modernes de mise en œuvre permettent aujourd'hui de répondre à des conditions géotechniques de plus en plus complexes tout en garantissant la sécurité et la durabilité des ouvrages.

Par ailleurs, les méthodes d'amélioration des sols, notamment les colonnes ballastées, offrent des solutions efficaces pour augmenter la capacité portante des terrains compressibles, réduire les tassements et limiter les risques géotechniques. Ces procédés contribuent à optimiser les coûts de construction tout en améliorant les performances globales des infrastructures.

Ainsi, une connaissance approfondie des fondations et du comportement des sols constitue une étape indispensable dans la conception des ouvrages. Une étude géotechnique rigoureuse, associée à un choix judicieux du type de fondation, permet d'assurer la stabilité, la pérennité et la sécurité des constructions. Face à l'évolution des techniques de construction et à la complexité croissante des projets, les fondations demeurent un domaine fondamental du génie civil, garantissant l'interaction harmonieuse entre l'ouvrage et son terrain d'assise. Le développement des méthodes d'investigation et des technologies d'exécution offre aujourd'hui aux ingénieurs des solutions toujours plus performantes pour concevoir des

ouvrages fiables, durables et adaptés aux exigences techniques, économiques et environnementales actuelles.,

Chapitre 3 : Stabilité des structures d'ouvrages vis-à-vis des efforts séismiques



1-Introduction

Les séismes ou tremblement de terre sont des mouvements brusques du sol durant quelques secondes à minutes dû à l'arrivée d'ondes élastiques transmises dans le globe et s'accompagne d'une libération soudaine d'une grande quantité d'énergie se traduit en surface par des vibrations du sol.

Il se produit de très nombreux séismes tous les jours, mais la plupart ne sont pas ressentis par les humains. Environ cent mille séismes sont enregistrés chaque année sur la planète. Les plus puissants d'entre eux comptent parmi les catastrophes naturelles les plus destructrices. La science qui étudie ces phénomènes est la *sismologie*.



Fig.3. 1 : Effondrement des structures après séisme de *Boumerdes* 23-05-2003

2. Elément d'étude de la sismologie

2.1- Foyer (Hypocentre)

Le lieu précis de naissance et l'endroit exacte de départ de séisme se situe en profondeur, à l'intérieur de la lithosphère.

2.2- Epicentre

L'endroit (point) en surface terrestre le plus proche situé à la verticalité de foyer ou l'intensité sismique (secousse) est maximale.

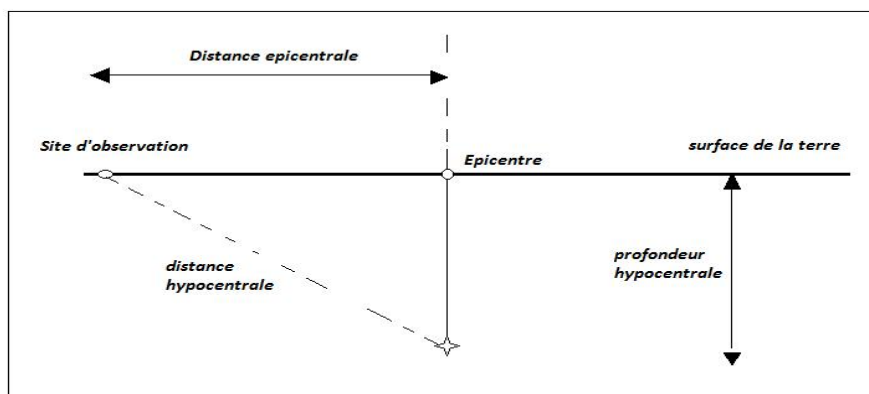


Fig. 3. 2.a : hypocentre et l'épicentre

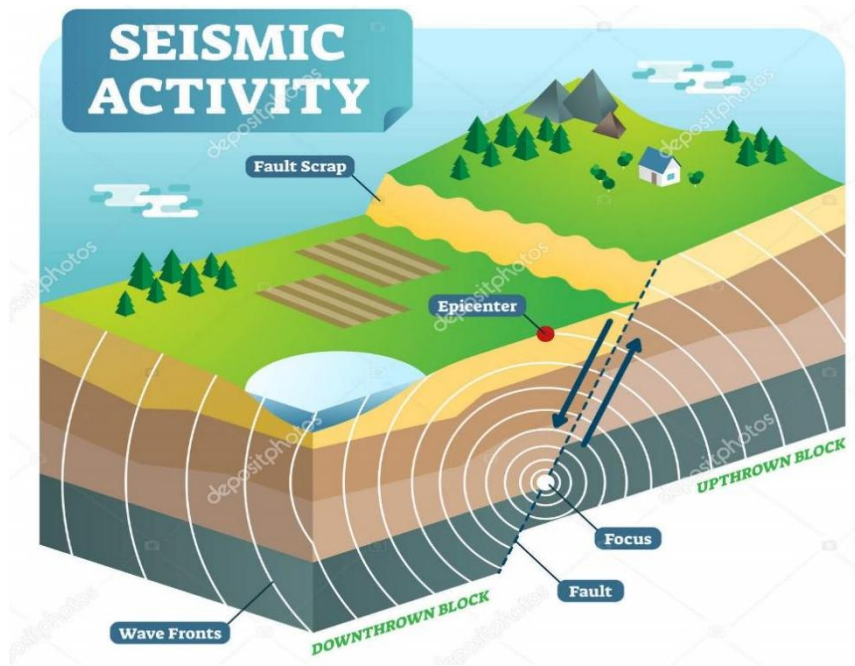


Fig. 3. 2.b : hypocentre et l'épicentre

2.3. Intensité

Est l'estimation qualitative de l'énergie libérée par un séisme à une échelle macrosismique ; elle correspond à l'évolution des dégâts observés sur le terrain dans un rayon allant de l'épicentre **0 m** jusqu'à **100 km**

L'intensité se fonde sur l'observation des effets et des conséquences du séisme sur des indicateurs communs en un lieu donné : effets sur les personnes, les objets, les mobiliers, les constructions, l'environnement. Le fait que ces effets soient en petit nombre ou en grand nombre sur la zone estimée est en soi un indicateur du niveau de sévérité de la secousse.

Les échelles d'intensité comportent des degrés généralement notés en chiffres romains, de I à XII pour les échelles les plus connues (Forel Rossi, Mercalli, MSK ou EMS).

Degrés	Dégâts observés
I	Seuls les sismographes très sensibles enregistrent les vibrations.
II	Secousses à peine perceptibles. Quelques personnes au repos ressentent le séisme.
III	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un petit camion.
IV	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion.
V	Séisme ressenti en plein air. Les dormeurs se réveillent.
VI	Les meubles sont déplacés.
VII	Quelques lézardes apparaissent dans les édifices.

VIII	Les cheminées des maisons tombent.
IX	Les maisons s'écroulent. Les canalisations souterraines sont cassées.
X	Destruction des ponts et des digues. Les rails de chemin de fer sont tordus.
XI	Les constructions les plus solides sont détruites. Grands éboulements.
XII	Les villes sont rasées. Bouleversements importants de la topographie.

Tab. 3. 1 : Echelle de Europeans Macrosismic Scale (EMS)1998

2.4. Magnitude

Notion introduite en 1935 par le sismologue Américain *Charles Francis Richter*. La magnitude correspond à une échelle microsismique elle indique l'énergie libérée au foyer de séisme ; et calculer à partir des différents types d'ondes sismiques en tenant compte de plusieurs paramètres comme la distance à l'épicentre, la profondeur de l'hypocentre, la fréquence du signal, le type de sismographe utilisé,

La magnitude n'est pas une échelle mais une fonction continue logarithmique. En raison de ce caractère logarithmique, lorsque l'amplitude du déplacement du sol est multipliée par 10, la magnitude augmente d'une unité. Ainsi, un séisme de magnitude 7 provoquera un déplacement du sol dix fois plus important qu'un événement de magnitude 6, cent fois plus important qu'un de magnitude 5.

La magnitude, souvent appelée magnitude sur l'échelle de Richter, terme le plus connu du grand public, est généralement calculée à partir de l'amplitude ou de la durée du signal enregistré par un sismographe. Plusieurs valeurs peuvent être ainsi calculées (magnitude locale, de durée, des ondes de surfaces, des ondes de volumes). Mais ces différentes valeurs ne sont pas très fiables dans le cas des très grands tremblements de terre.

2.5. Séismogramme (sismomètre)

Un sismographe est un instrument de mesure équipé d'un capteur qui enregistre les mouvements du sol. Pour obtenir le mouvement tridimensionnel de l'onde sismique, il est nécessaire d'enregistrer trois directions différentes formant un trièdre (en général, une direction verticale, et deux directions horizontales perpendiculaires).

Les sismographes sont conçus pour enregistrer une seule composante verticale ou horizontale car la mécanique est différente. Les observatoires sismologiques sont donc équipés de différents sismographes.

Un sismomètre est constitué d'une masse très lourde placée sur une barre fixée à une de ses extrémités et qui pivote dans un plan horizontal (pour les deux sismomètres mesurant les composantes horizontales du déplacement) ou dans un plan vertical (pour le sismomètre mesurant la composante verticale).

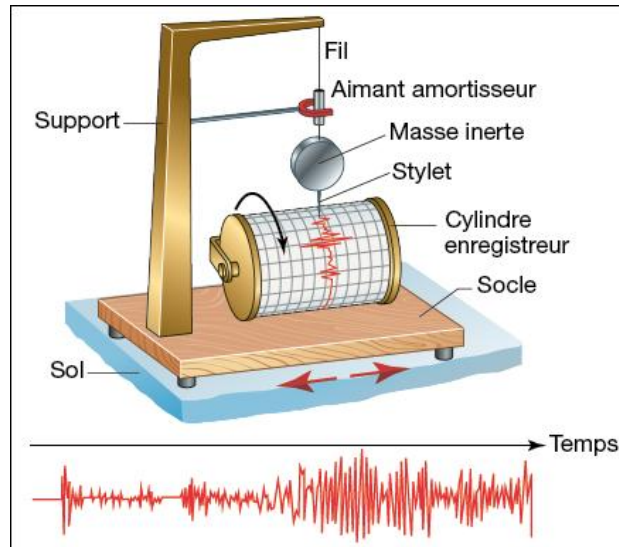


Fig. 3. 3 : Séismographe (sismomètre)

2.6 Les ondes sismiques (élastiques)

Au moment du relâchement brutal des contraintes de la croûte terrestre (séisme), deux grandes catégories d'ondes peuvent être générées.

2.6.1 Les ondes de volumes (profondes)

Il s'agit des ondes de volume qui se propagent à l'intérieur de la Terre ; elles sont regroupées en deux familles

2.6.1.1 Les ondes (P)

Les ondes P ou ondes *de compression*. Le déplacement du sol se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde. Les ondes P sont les plus rapides (de 5 à 16 km/s près de la surface) elles se propagent dans tous les milieux (liquide, solides, gazeux). Ce sont les ondes enregistrées en premier sur un sismogramme ;

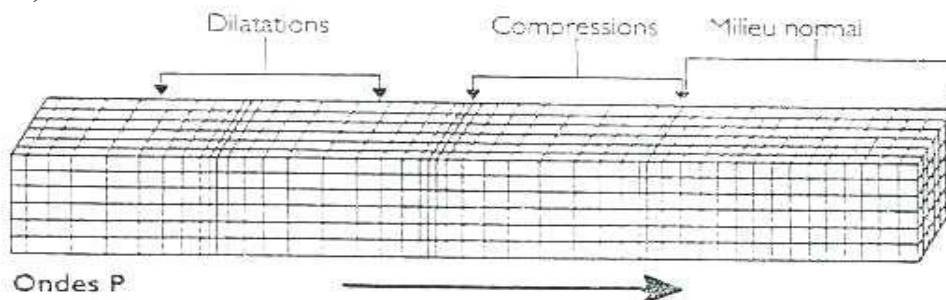


Fig. 3. 4: Les ondes type P

2.6.1.2 Les ondes (S)

Ce sont des ondes secondaires ou ondes de cisaillement. Les vibrations s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde, comme sur une corde de guitare. Plus lentes que les ondes P, elles apparaissent en second sur les sismogrammes avec une vitesse (de 3 à 7 km/s) Elles ont une particularité qu'elles ne se déplacent pas dans des liquides

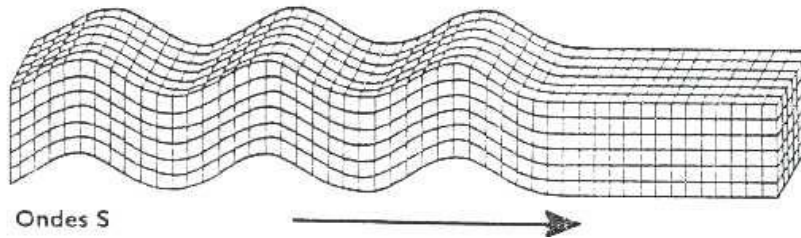


Fig. 3. 5: Les ondes type S

2.6.2 Les ondes de surfaces

Elles se sont appelées ainsi à leur mode de propagation surfacique à la croûte terrestre ; elles se propagent moins vite que les ondes de volume et se déplacent avec une vitesse constante de l'ordre de 3 km/s. Elles sont guidées par la surface de la Terre, mais sont plus forte amplitude et sont généralement les ondes qui produisent les effets destructeurs des séismes.

Les ondes de surface se subdivisent en deux groupes :

2.6.1.2 Les ondes de Rayleigh (R)

Elle se propage au voisinage de la surface de milieux homogènes et non homogènes. Elle résulte d'interférences entre les composantes verticales des ondes P et S. Comme le montre la figure 6, on peut l'enregistrer sur les trois composantes d'un sismographe et pendant une durée qui peut aller jusqu'à plusieurs minutes.

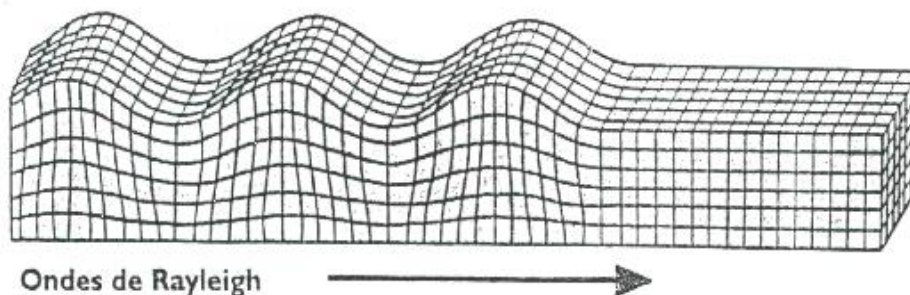


Fig. 3. 6: Les ondes type R

2.6.1.2 Les ondes de Love (L)

Elle se propage seulement dans les solides non homogènes. C'est une onde transversale polarisée dans le plan horizontal. Le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S mais sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent donc un ébranlement horizontal, cause de nombreux dégâts par cisaillement des fondations des édifices.

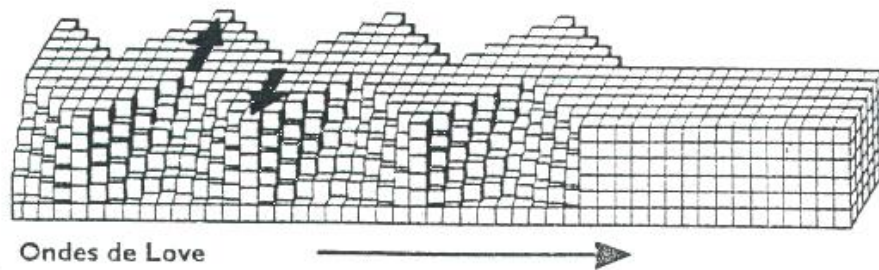


Fig. 3. 7: Les ondes type L

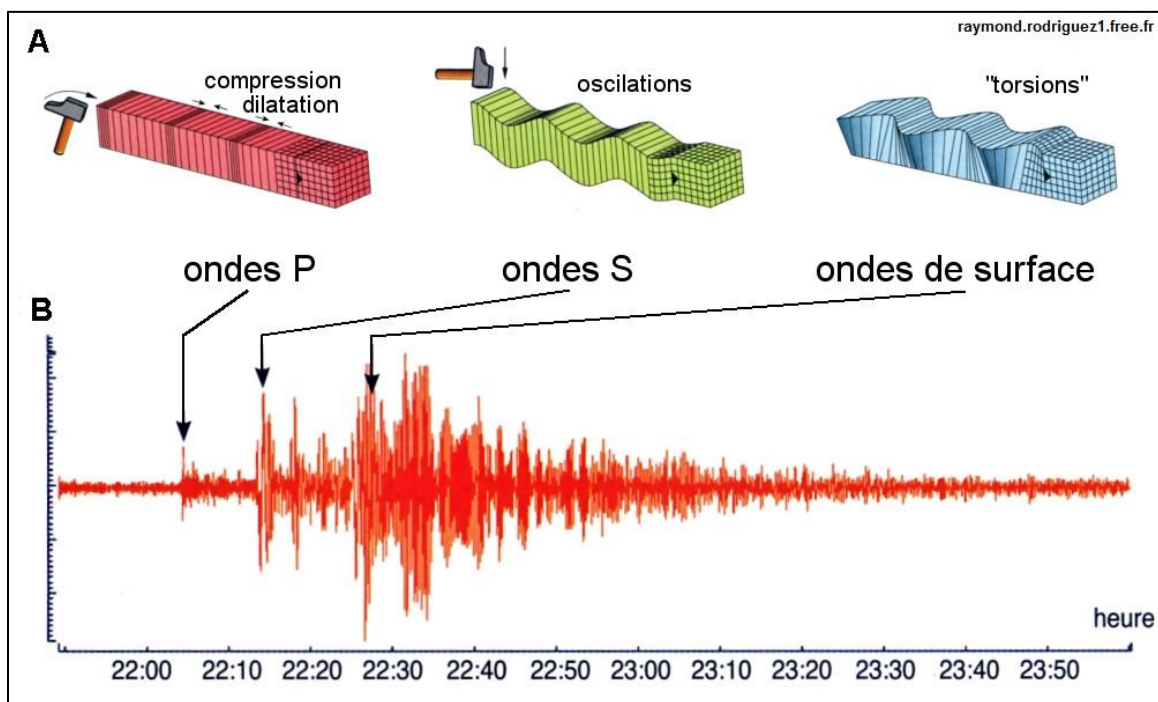


Fig. 3. 8: Les ondes P, S et les ondes de surface sur une excitation sismique

2.7 Sismogramme

Un sismogramme (ou séismogramme) est l'enregistrement des ondes sismiques qui se propagent lors d'un séisme, généralement réalisé au moyen d'un sismographe.

L'abscisse du graphique représente habituellement le temps alors que l'ordonnée représente la valeur instantanée de l'accélération du point de mesure de l'onde sismique selon un ou des axes donnés (x, y, ou z)

La forme générale de la courbe est classiquement celle d'un oscillateur harmonique amorti, puisque le sismogramme matérialise en quelque sorte le « mouvement » ou l'accélération d'une particule du terrain soumise à la traversée de l'onde sismique sinusoïdale.

Les sismogrammes et grâce au comportement des ondes sismiques indiquent la nature physique et chimique de tous les milieux traversés par les ondes cependant les ondes P et S.

Le premier est la composante WE de l'enregistrement d'accélération à la station de Tolmezzo du choc principal du séisme de Friuli (Italie) le 6 mai, 1976, dénoté comme TMZ-270. Les données ont été prélevées à 200 hertz pour un nombre total de 7279 points d'enregistrement. L'accélération maximale horizontale, est égale à 0,315 g, a été atteinte lorsque $t=3.935s$, la plupart de l'énergie est incluse dans une gamme de fréquence entre 0,8 et 5 hertz, avec une fréquence prédominante de 1,5 hertz. L'intensité d'Arias est 1,20 m/s et la durée significative est de 4,92 s (Trifunac et Brady, 1975). L'histoire d'accélération et le spectre de l'amplitude de Fourier sont présentés dans la figure 4.

Le second est la composante WE de l'enregistrement d'accélération à la station de Keddaral du choc principal du séisme de Boumerdès (Algérie) le 21 mai 2003. Les données ont été prélevées à 200 hertz pour un nombre total de 7000 points d'enregistrement. L'accélération maximale horizontale est égale à 0.331g, a été atteinte lorsque $t = 7.415 s$. La fréquence prédominante est de 5 hertz. L'intensité d'Arias et la durée significative sont 0.669 m/s et 14.17 s, respectivement. L'histoire d'accélération et le spectre de l'amplitude de Fourier sont montrés dans la figure 5.

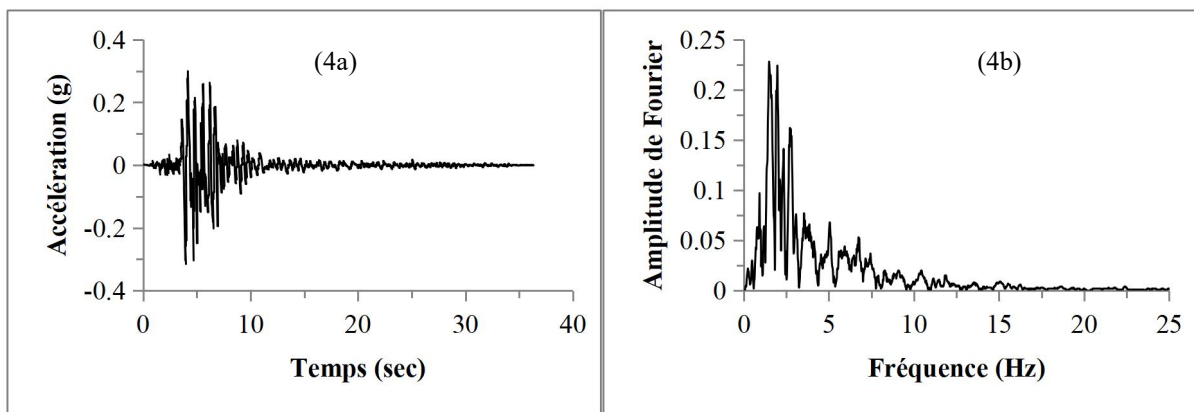


Figure 4. Signal d'entrée de TMZ-270 : (4a) histoire d'accélération (4b) spectre de Fourier.

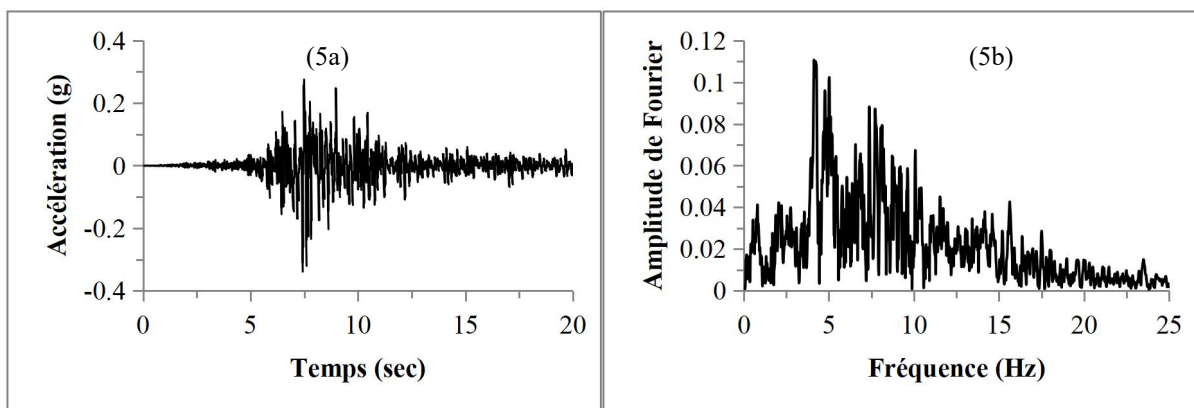


Fig. 3. 9. Signal d'entrée de Keddaral : (5a) histoire d'accélération (5b) spectre de Fourier.

3. La Conception parasismique

Rassemblement de plusieurs aspects essentiels relatifs à la conception parasismique, ayant un rôle primordial dans la vulnérabilité des constructions face aux actions sismiques :

- ✓ Choix de site et implantation des ouvrages.
- ✓ Investigations géotechniques et fondations.
- ✓ Superstructure, matériaux et procédés de construction.
- ✓ Méthodes de calcul et modélisation des structures

4. Les règlements Parasismiques

Tous les règlements parasismiques élaborés par des chercheurs pour tous les pays touchés par les risques majeurs (séisme) basent sur un même principe solide et de présenter des règles consiste à préserver les vies humaines ; après de prévenir les risques d'effondrement des planchers et des murs et admettent éventuellement des dommages structuraux dans des éléments tels que les poutres mais surtout pas au niveau des poteaux sous peine d'effondrement.

4.1 Le règlement Parasismique Algérien (RPA 2024)

Le document technique « DTR BC 2-48 » portant sur les « règles parasismiques algériennes RPA 99 » se situe dans la continuité des documents précédents « RPA 81, version 1983 » et « RPA 88 » dont il garde la philosophie originelle. Il constitue en fait une actualisation qui s'avère nécessaire après près de deux décennies de pratique riche et diversifiée de la part des scientifiques et techniciens nationaux des bureaux d'études et de contrôle, des entreprises et des institutions de formation supérieure. Cette actualisation tient compte également des leçons tirées des récents séismes survenus en Algérie tels que ceux de Oued Djer (oct 1988), Tipaza (oct 1989), Mascara (août 1994), ou à l'étranger, tels que Spitak / Arménie (1988), Sanjan / Iran (1990), Loma Prieta / Californie (1989), Northridge / Californie (1994), Kôbe/Japon (1995), ou Izmit/Turquie (1999).

4.2 Les spécifications du (RPA 2024)

a-Domain d'application

Les présentes règles sont applicables à la conception et au calcul des constructions courantes soumises à l'action sismique sur le territoire national. Toutefois, elles ne s'appliquent pas directement aux ouvrages suivants, qui nécessitent des règlements ou études spécifiques :

- Les constructions et installations pour lesquelles les conséquences d'un dommage, même limité, peuvent être d'une gravité exceptionnelle, telles que les centrales nucléaires, les installations de production, de stockage ou de transport de gaz naturel liquéfié (GNL), ainsi que les installations contenant des produits inflammables, explosifs, toxiques ou polluants ;
- Les ouvrages d'art tels que les barrages, les ponts, les tunnels, les ouvrages portuaires et maritimes ;
- Les réseaux et ouvrages enterrés ;
- Les ouvrages spéciaux soumis à des réglementations particulières.

b-Classification des zones sismiques

Le territoire national est divisé en sept (07) zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité, Fig. 3.10, et l'Annexe A précise cette répartition par wilaya et par commune, soit :

Sismicité	Zone
Très faible	0
Faible	I
Faible à moyenne	II
Moyenne	III
Moyenne à élevée	IV
Elevée	V & VI

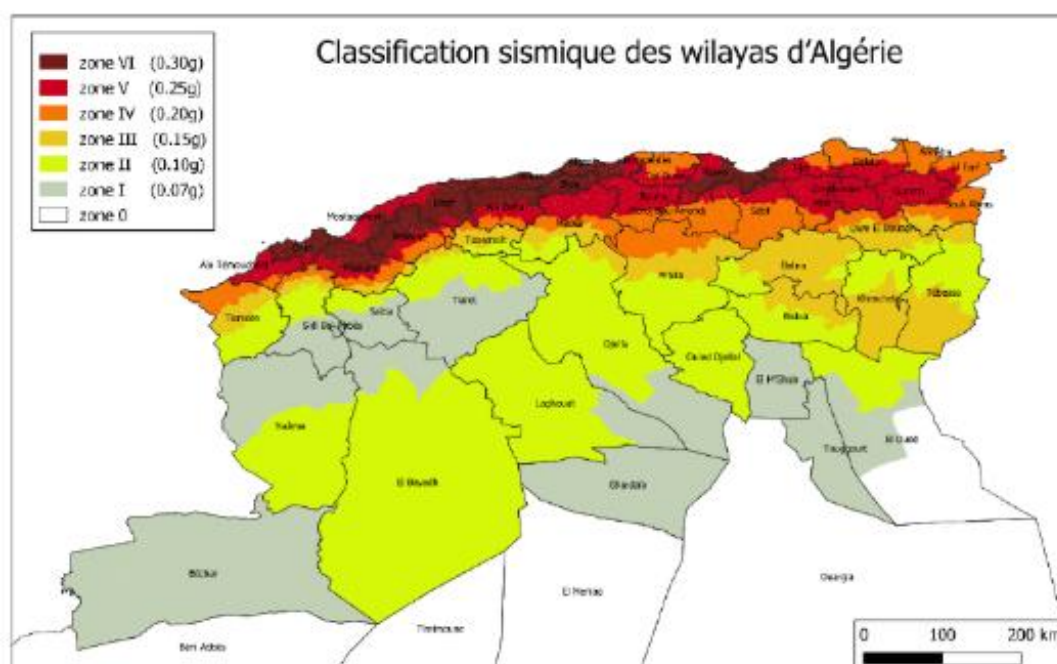


Fig. 3. 10: Carte de Zonage du Territoire National

L'aléa est pris en compte par un seul paramètre, A : il s'agit de l'accélération maximale normalisée par rapport à l'accélération de la pesanteur, g , et nommée en coefficient d'accélération de référence de zone, au niveau d'un sol de classe $S1$ (au rocher). Pour l'objectif de non-effondrement, elle est représentée par sa valeur caractéristique, choisie comme la fractile 90% ayant la période de retour égale à $T_r = 475$ ans.

Un coefficient d'importance, I , égal à 1.0 est associé à cette période de retour, $T_r = 475$ ans. Pour des périodes de retour autres que la période, $T_r = 475$ ans, l'accélération de calcul, au niveau d'un sol de classe $S1$, est égale à $(A.I.g)$,

d. Catégories et critères de classification des sites

Les effets locaux des sols peuvent modifier considérablement la réponse sismique d'un site. Afin de prendre en compte ces effets dans le calcul des structures, le RPA 99 Version 2003 modifié et complété en 2024 classe les terrains en plusieurs catégories selon leurs caractéristiques géotechniques et mécaniques.

La classification d'un site est établie à partir des résultats des investigations géotechniques, notamment :

- La nature lithologique des formations géologiques ;
- Les caractéristiques mécaniques des sols ;
- La vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement dans les trente premiers mètres du sol (V_{s30}) ;
- Les résultats des essais géotechniques in situ et en laboratoire ;
- L'épaisseur et la stratification des couches de sol.

Les sites sont classés dans les catégories suivantes :

- Site $S1$: Roche ou roche tendre
- Site $S2$: Sol ferme
- Site $S3$: Sol meuble
- Site $S4$: Sol très meuble

e. Critères de classification de site

La détermination de la catégorie de site doit être effectuée à partir d'une étude géotechnique conforme à la réglementation en vigueur. Lorsque les données disponibles sont insuffisantes pour caractériser précisément le terrain, il convient de retenir la catégorie la plus défavorable compatible avec les informations existantes.

Dans les cas particuliers présentant des risques spécifiques (liquéfaction, instabilités de pente, sols sensibles ou hétérogènes), des études géotechniques complémentaires et des analyses dynamiques spécifiques peuvent être exigées.

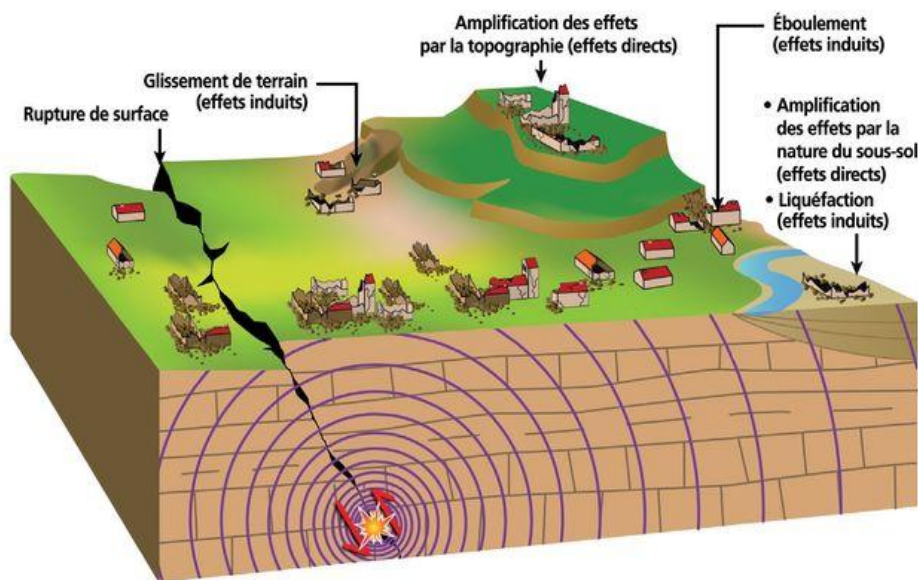


Fig. 3. 11. Les effets de site

f . Classification des ouvrages selon leur configuration

a1. Le bâtiment doit présenter une configuration sensiblement symétrique vis-à-vis de deux directions orthogonales aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celle des masses.

•a2. A chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne doit pas dépasser 15% de la dimension du bâtiment, mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.

•a3. La forme du bâtiment doit être compacte avec un rapport longueur/largeur du plancher inférieur ou égal 4. La somme des dimensions des parties rentrantes ou saillantes du bâtiment

dans une direction donnée ne doit pas excéder 25% de la dimension totale du bâtiment dans cette direction.

•a4. Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante vis à vis de celle des contreventements verticaux pour être considérés comme indéformables dans leur plan. Dans ce cadre, la surface totale des ouvertures de plancher doit rester inférieure à 15% de celle de ce dernier.

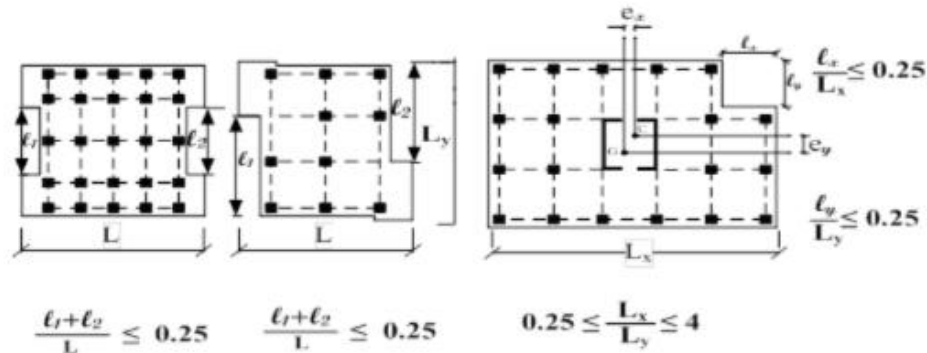


Fig. 3. 12 : Limites des décrochements en plan

e.2 Régularité en élévation

b1. Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu, dont la charge ne se transmet pas directement à la fondation. •b2. Aussi bien la raideur que la masse des différents niveaux restent constantes ou diminuent progressivement et sans changement brusque de la base au sommet du bâtiment. •b3. Le rapport de masse, sur rigidité de deux niveaux successifs, ne doit pas varier de plus de 25% dans chaque direction de calcul. •b4. Dans le cas de décrochements en élévation, la variation des dimensions, en plan du bâtiment entre deux niveaux successifs, ne dépasse pas 20% dans les deux directions de calcul et ne s'effectue que dans le sens d'une diminution avec la hauteur. La plus grande dimension latérale du bâtiment n'excède pas 1.5 fois sa plus petite dimension. Toutefois, au dernier niveau, les éléments du bâtiment, tels que buanderies, salle de machines d'ascenseurs, etc, pourront ne pas respecter les règles b3 et b4 et être calculés conformément aux prescriptions relatives aux éléments secondaires.

D'une manière générale, il convient de se reporter aux schémas illustratifs fournis en Figure 3.13:

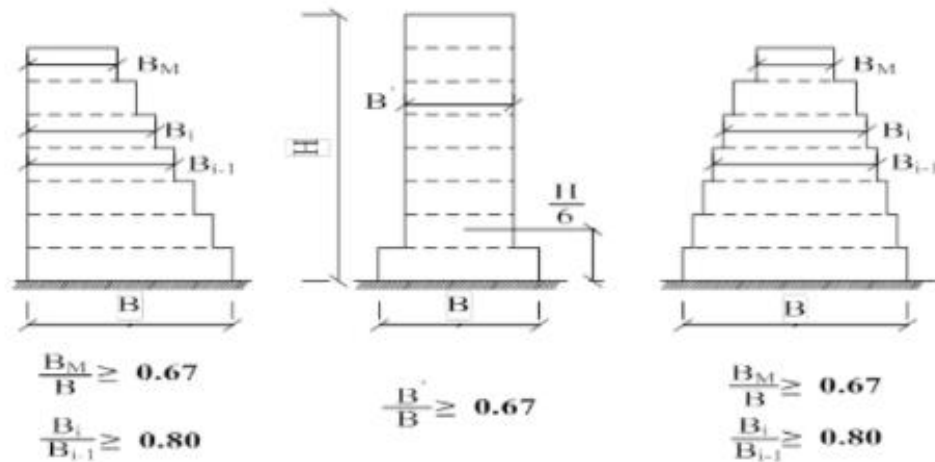


Fig. 3. 13 : Limites des décrochements en élévation

5. Le Séisme et les constructions en Béton Arme et en maçonnerie (Cas du séisme de Boumerdes 21-05-2003)

Le 21 Mai 2003, à 19h44 , toute la région centre du pays se mit à vibrer fortement sous le coup d'un séisme de forte ampleur d'une magnitude locale de 6.8 sur l'échelle de Richter. Son épicentre a été localisé en mer en face des villes de Zemmouri et de Boumerdes.

La zone touchée par ce tremblement de terre comprend entre 3 et 4 millions d'habitant, entraînant la mort de milliers de personnes et causant des dégâts matériels extrêmement importants estimés à 5 Milliard de dollars.

Dans les autres Wilayas environnantes (Alger, Tizi Ouzou) les dégâts étaient moindres mais néanmoins importants. Par exemple à Alger des milliers d'immeubles ont été touchés. Ce séisme devient ainsi le plus meurtrier qu'ait connu la région algéroise depuis plusieurs siècles. Après le séisme d'El Asnam du 10.10.1980 ($M_w : 7.3$), il est le second événement majeur qui affecte l'Algérie du Nord.

5.1 Investigation géotechnique

Plusieurs désordres liés relativement aux problèmes géotechniques ont été observés lors de ce séisme, tels que l'effet du talus, rupture des roches, liquéfaction du sol, ainsi que un ras de marée et retraitement de la mer

5.2 Les effets sur les constructions

A partir des expertises et des investigations effectuées sur les zones les plus touchées dans les wilayas de Boumerdes et celle d'Alger, il a été remarqué que les dégâts sont d'intensités différentes. Ces dégâts sont très disparates allant de simples fissurations non structurales jusqu'à l'effondrement total ou partiel. Un aperçu global des désordres observés par type d'usage est présenté en ce qui suit



Fig. 3. 14 : Liquéfaction du sol



Fig. 3. 15 : Retirement de la mer



Fig. 3. 16 : Défaut de ferrailage



Fig. 3. 17 : Défaut de réalisation



Fig. 3. 18 : Ségrégation des bétons



Fig. 3. 19: Mauvaise reprise de bétonnage

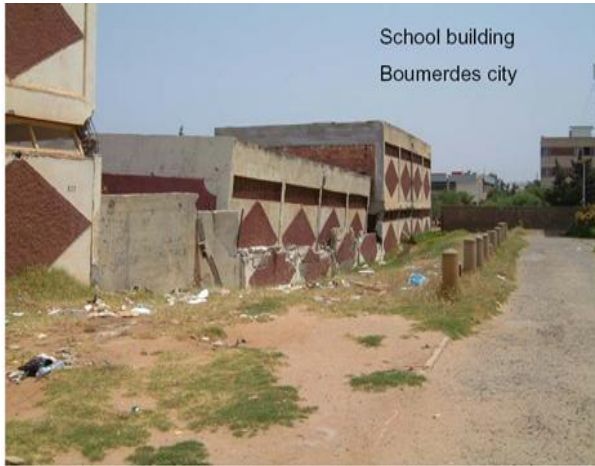


Fig. 3. 20 : Adaptation de plan sans étude



Fig. 3. 21 : Épaisseur minime des joints

Conclusion

Les séismes constituent l'un des phénomènes naturels les plus redoutables en raison de leurs conséquences humaines, économiques et matérielles souvent considérables. La compréhension de leur origine, de leurs mécanismes de propagation et de leurs effets sur les ouvrages est donc essentielle pour tout ingénieur impliqué dans la conception et la réalisation des structures de génie civil.

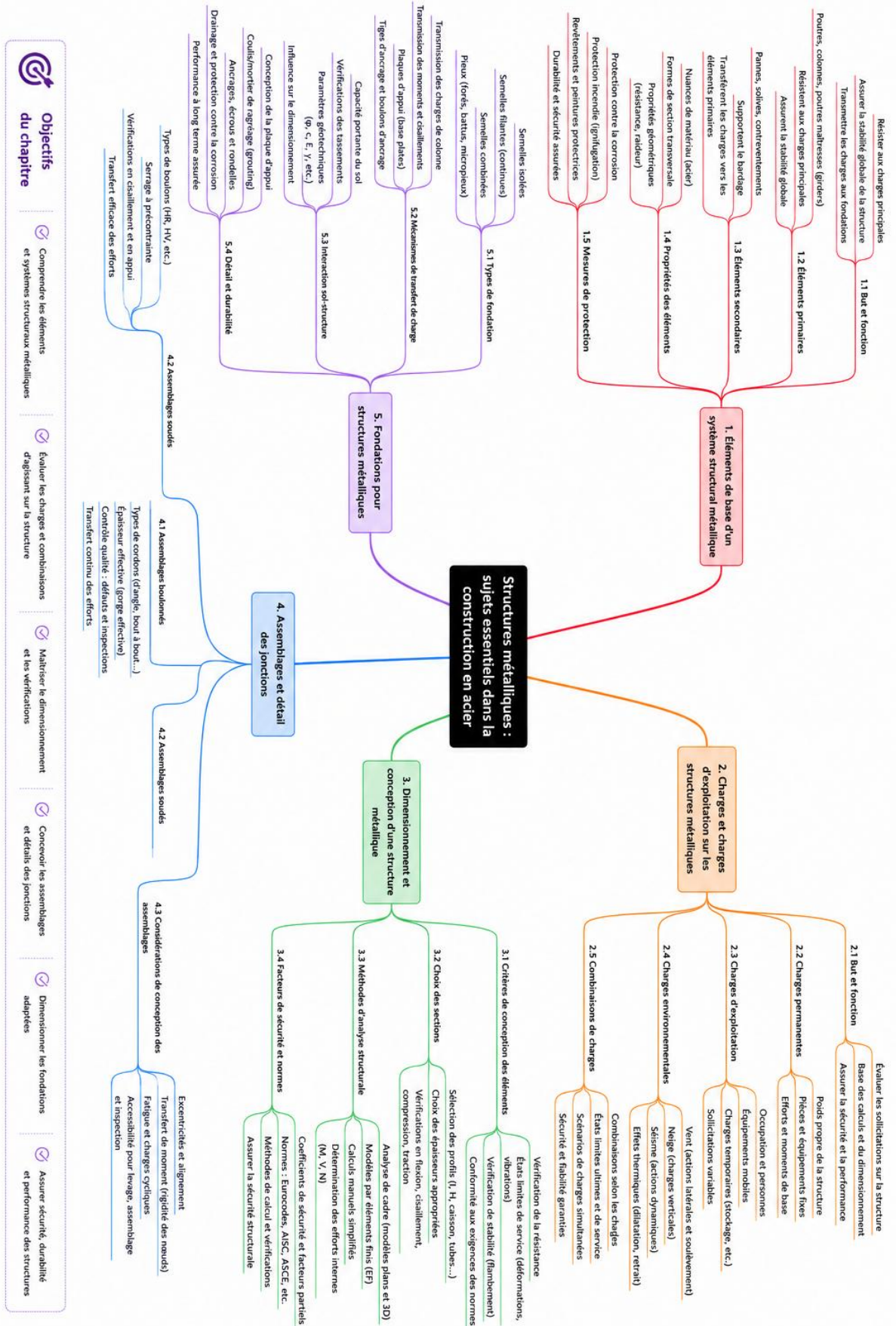
Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les notions fondamentales de la sismologie, notamment le foyer, l'épicentre, l'intensité, la magnitude ainsi que les différents types d'ondes sismiques responsables de la propagation de l'énergie libérée lors d'un tremblement de terre. L'analyse des sismogrammes permet de mieux comprendre le comportement des mouvements du sol et de caractériser les sollicitations auxquelles les structures peuvent être soumises.

L'étude de la conception parasismique a montré que la sécurité des constructions dépend non seulement du dimensionnement structural, mais également du choix du site, de la qualité des investigations géotechniques, des matériaux utilisés et du respect des principes de régularité en plan et en élévation. Les règlements parasismiques, notamment le RPA 2024 en Algérie, constituent un cadre technique indispensable permettant de réduire la vulnérabilité des ouvrages et de préserver les vies humaines en cas de séisme.

L'exemple du séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 a mis en évidence l'importance des études géotechniques, de la qualité de l'exécution des travaux et du respect des règles de conception. Les nombreux désordres observés, tels que les défauts de ferrailage, les insuffisances de bétonnage, les irrégularités structurelles ou encore les phénomènes de liquéfaction, démontrent que les conséquences d'un séisme sont souvent aggravées par des erreurs de conception ou de réalisation.

Ainsi, la conception parasismique ne consiste pas à empêcher totalement les dommages, mais à garantir un comportement adéquat des structures afin d'éviter leur effondrement et de protéger les occupants. **L'application rigoureuse des règlements, associée à une bonne connaissance du comportement dynamique des structures et des caractéristiques géotechniques des sites, constitue la meilleure stratégie pour réduire le risque sismique. Face à l'urbanisation croissante et à l'augmentation des enjeux humains et économiques, l'ingénierie parasismique demeure un domaine essentiel pour la construction d'ouvrages sûrs, résilients et capables de résister aux séismes majeurs tout en assurant la protection des populations et des infrastructures.**

Chapitre 4 : Système porteur des bâtiments métalliques



1. INTRODUCTION

Les bâtiments industriels (constructions sportives, marchés, hangars, ateliers d'aviation) sont des constructions caractérisées par leurs grandes dimensions (grandes hauteurs et portées). Ils sont composés d'une ossature et des revêtements métalliques de tous types.



Fig. 4. 1: Des bâtiments industriels

2. Bâtiments industriels

Un système porteur d'un bâtiment ou ouvrage (des structures) est l'ensemble des parties de construction et assemblages nécessaires pour supporter et répartir les charges ainsi que pour assurer la stabilité.

2.1 La composition des batiments a portique en acier

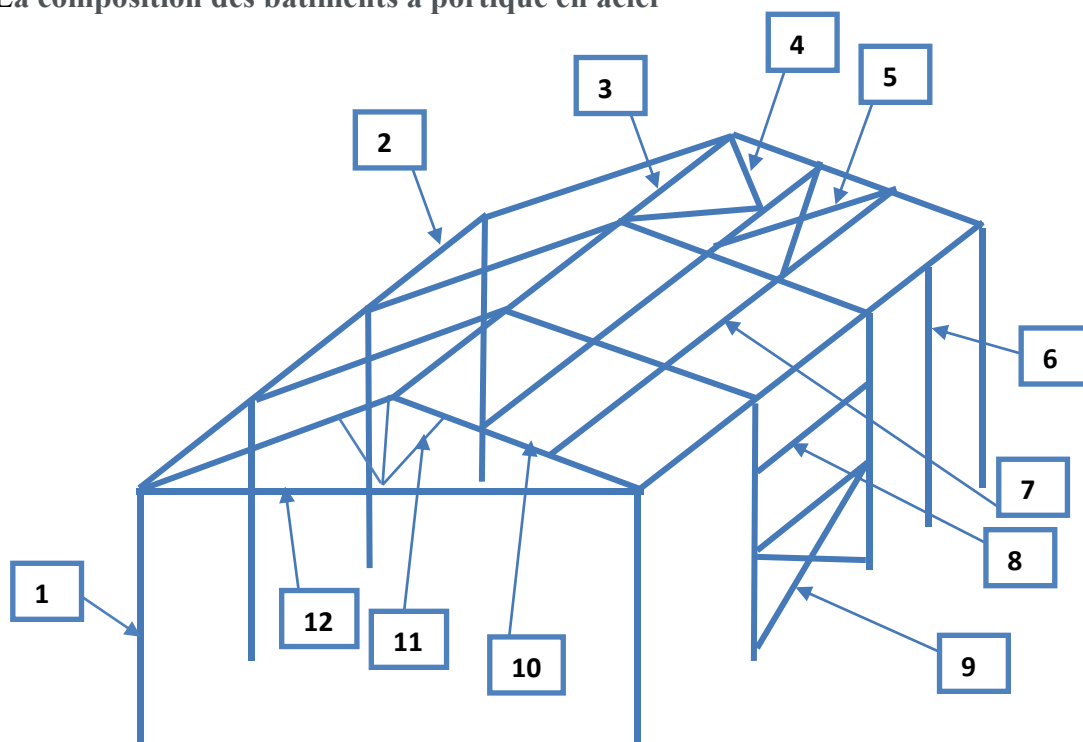


Fig . 4. 2 et Tab. 4. 1: Composition des batiments industriels

1	Poteau	7	Panne intermédiaire
2	Panne de rive (sablière)	8	Lisses de Bardage
3	Pannes (faitiere) de faîtage	9	Poutre au vent
4	Les Liernes	10	Les Traverses
5	A-Poutre au vent en long-pan	11	la suspente
6	Potelets	12	Poutre de porte

1. *Ossature primaire* : cadres rigides transversaux (y compris les cadres rigides intermédiaires et d'extrémité), poutres de plancher, poutres de grue, systèmes de support, etc.
2. *Ossature secondaire* : pannes de toit et chevrons de mur, etc.
3. *Structure de l'enveloppe* : panneaux de toit et de mur ;
4. *Structures auxiliaires* : escaliers, plates-formes, rampes, etc ;
5. *Fondation*.

2.2 Systèmes porteurs des bâtiments :

un bâtiment à étage est composé de planchers superposés et des poteaux. L'ossature ainsi constituée assure la transmission aux fondations des charges verticales sollicitant les planchers. Ainsi que les actions verticales dues au vent ou aux séismes. L'ossature doit donc être complétée par des contreventements horizontaux et verticaux qui transmettent ces efforts aux fondations.

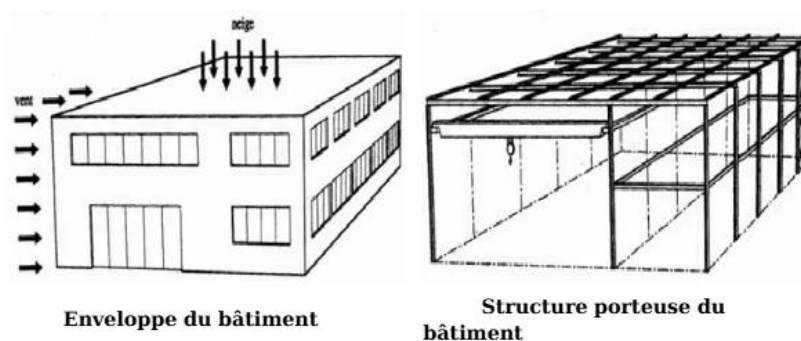


Fig. 4. 3: Systèmes porteurs des bâtiments

2.3 Systèmes porteurs des halles industrielles :

pour une halle classique, les systèmes porteurs sont souvent constitués par des cadres ou des portiques plans. Ces portiques comprennent des (poutres traverses ou fermes), supportant les pannes et la couverture, et des poteaux qui servent d'appuis à la traverse et transmettent les charges aux fondations.

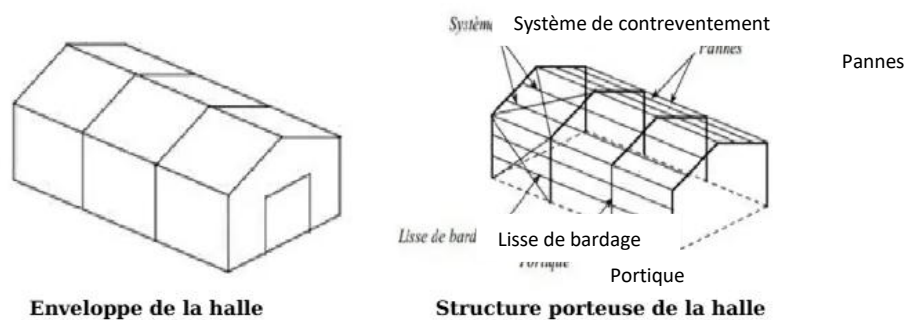


Fig. 4. 4: Systèmes porteurs des halles

Les principaux éléments structuraux du portique sont : les poteaux, les poutres (traverses et fermes), les nœuds et les pieds de poteaux.

3. TYPES DE PORTIQUES

Généralement, on constate deux types de portiques :

3.1 Portiques à âmes pleines

Ces portiques sont constitués par l'assemblage d'éléments en I ou H, laminés ou reconstitués soudés, qui s'avèrent les mieux adaptés aux sollicitations de flexion.

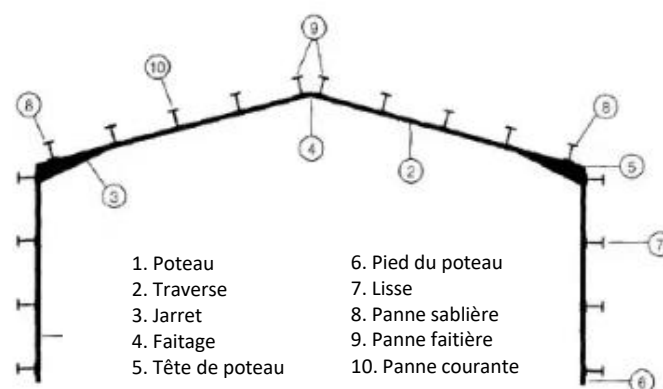


Fig. 4. 5: Portique courant

3.2. Portiques en treillis

Les portiques en treillis sont composés de barres assemblées formant des triangles. Les efforts sont principalement transmis sous forme de traction et de compression dans les différentes barres. Ils sont utilisés pour les grandes portées car ils permettent de réduire le poids propre de la structure tout en conservant une bonne résistance mécanique.

4. SYSTEMES PORTEURS USUELS

Les systèmes porteurs usuels sont utilisés dans des structures moins complexes que les halls industriels, tout en étant adaptés à des bâtiments à faible ou moyenne portée.

Les schémas statiques des portiques sont regroupés en deux catégories : ceux à pieds de poteaux articulés et ceux à pieds de poteaux encastrés. Il faut bien se rendre compte que plus les structures sont de degrés d'hyperstaticité élevé, plus elles sont stables, rigides et indéformables, mais plus leur coût est élevé (matière et main d'œuvre, tant à l'atelier qu'au chantier) .

4.1 Ossature articulée (Portique à pieds de poteaux articulés)

Les pieds de poteaux articulés sont souvent réalisés en soudant une platine d'assise à l'extrémité du poteau laquelle est reliée au béton de fondation par deux, voir quatre tiges d'ancrage disposées au niveau, ou à proximité de l'axe du profil.

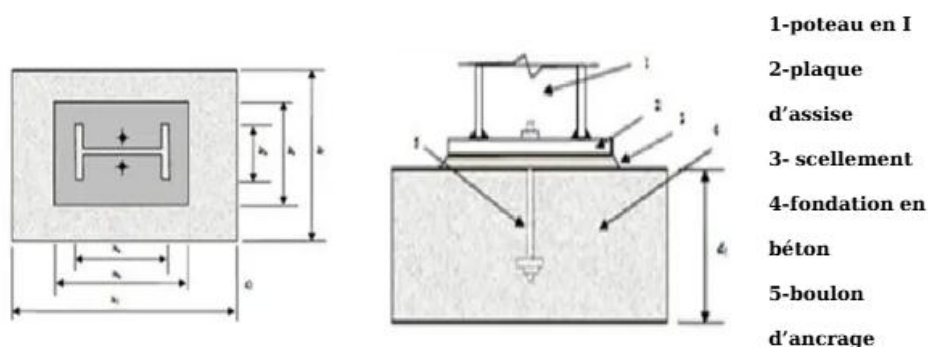


Fig. 4. 6: Les pieds de poteaux articulés et l'emplacement des boulons d'ancrage pour les ossatures articulées

	Schémas	Degrés de stabilités
Pieds de poteaux articulés		Hypostatique degré 2
		Hypostatique de degré 1
		isostatique
		Hyperstatique de degré 1

Ce portique articulé à la base des poteaux est hyperstatique. C'est la rigidification des assemblages poteaux-poutres qui assure la stabilité des panneaux (cadres). Il utilise moins de matière que le portique à trois articulations. Avec une traverse brisée ou en biais, il est utilisé dans les halles ; avec une traverse droite, on le retrouve dans les bâtiments à étages.

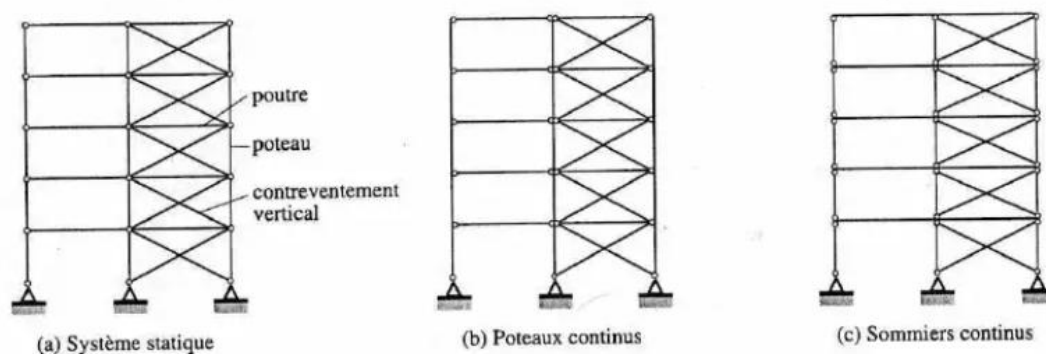


Fig. 4. 7: Contreventement vertical pour Système statique, Poteaux continus et Sommier continu

4.2 Systèmes porteurs des bâtiments

Ci-dessus, principes de cadres articulés et contreventés pour des bâtiments multi-étages : – à poteaux continus (à gauche) Leur hauteur est en pratique limitée à deux niveaux maximum pour des raisons de transport ; – à poutres continues (à droite). La longueur des poutres est limitée en pratique à 18 m.

4.3 Ossatures en cadres rigides (Pieds de poteaux encastrés)

Les pieds de poteaux encastrés dans le cas de profilé en I transmettant un effort normal, un effort tranchant et un moment fléchissant. Ils sont souvent réalisés en soudant une plaque d'assise rectangulaire à l'extrémité du poteau de manière symétrique pour qu'elle déborde de tous côtés au-delà des bords externes de la semelle du poteau. Des rangées de boulons d'ancrage, perpendiculaires par rapport à l'axe de forte inertie du poteau.

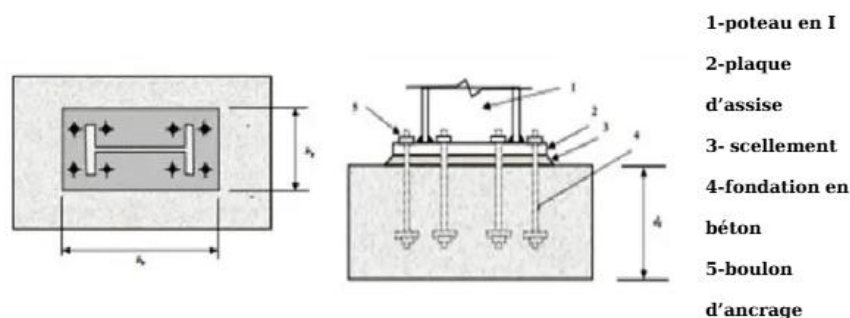


Fig. 4. 8: Les pieds de poteaux articulés et l'emplacement des boulons d'ancrage pour les ossatures en cadres rigides

Suivant la répartition de ces liaisons sur les portiques (appuis simples, des articulations, et des encastrement) on peut obtenir des structures hypostatiques, isostatiques ou hyperstatiques.

	Schémas	Degrés de stabilités
Pieds de poteaux encastrés		isostatique
		Hyperstatique de degré 1
		Hyperstatique de degré 2
		Hyperstatique de degré 3

Du fait des encastrements en pied, les sections peuvent être moins importantes que dans les cas précédents pour résister aux moments de flexion. La limitation des déplacements sous

l'action des forces horizontales conduit à l'augmentation des sections des poutres et des poteaux.

Ces portiques ont un degré d'hyperstaticité supérieur. Ils sont utilisés lorsque des charges très importantes sont mises en œuvre et lorsque la portée doit être très grande. En revanche, cette structure absorbe peu les tassements différentiels et les variations thermiques. C'est une forme courante dans les bâtiments à étages. Cependant les « nœuds » (assemblages) peuvent être gênants, au niveau des planchers par exemple, à cause des goussets ou des équerres nécessaires à l'assemblage. Les bases des portiques peuvent être fixées sur des infrastructures en béton armé ou des fondations, ou sur des poteaux et des poutres de l'étage inférieur. Ce sont des structures relativement coûteuses (environ 15 à 20 % de plus que des structures avec des contreventements), mais elles présentent l'avantage d'un moindre encombrement de l'espace et d'un usage plus flexible dans le temps en cas de changement d'affectation des locaux ou des immeubles

Les cadres rigides à portée unique sont principalement utilisés dans les bâtiments nécessitant un faible encombrement latéral. En général, la portée est de 18 à 36 m. Des sections en forme de H, soudées ou laminées, sont souvent utilisées. La position et la hauteur des poutres et des poteaux à section variable sont déterminées en fonction du diagramme de distance de flexion et de la portée. Le cadre rigide à travées multiples est adapté aux grands bâtiments, et sa section transversale est similaire à celle d'un cadre rigide à travées simples, mais la colonne centrale adopte généralement une section transversale égale. À l'heure actuelle, la portée maximale du portique atteint 72 mètres.

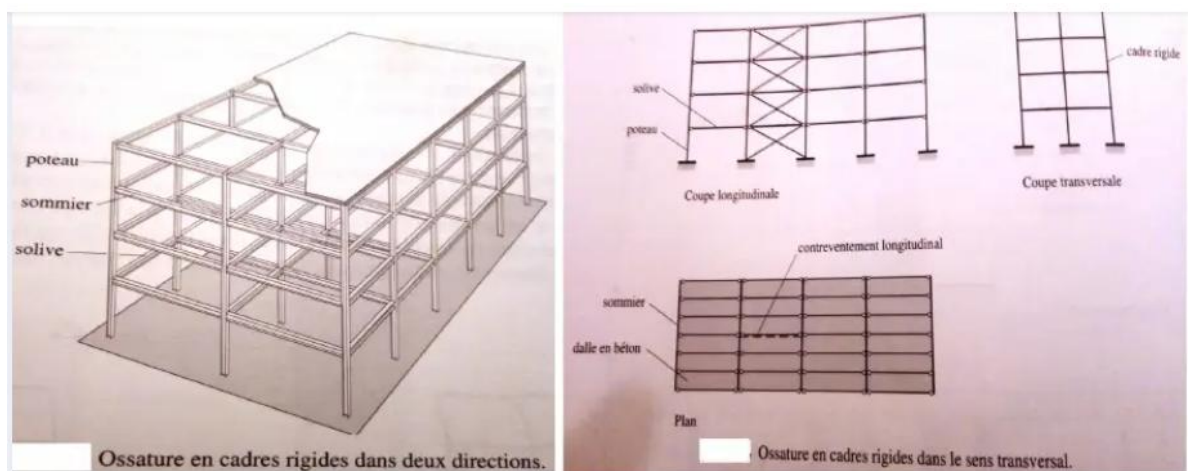


Fig. 4. 9: Ossatures en cadres rigides dans les deux directions et ossature en cadres rigide dans les sens transversal

4.4 Contreventement par portiques superposés

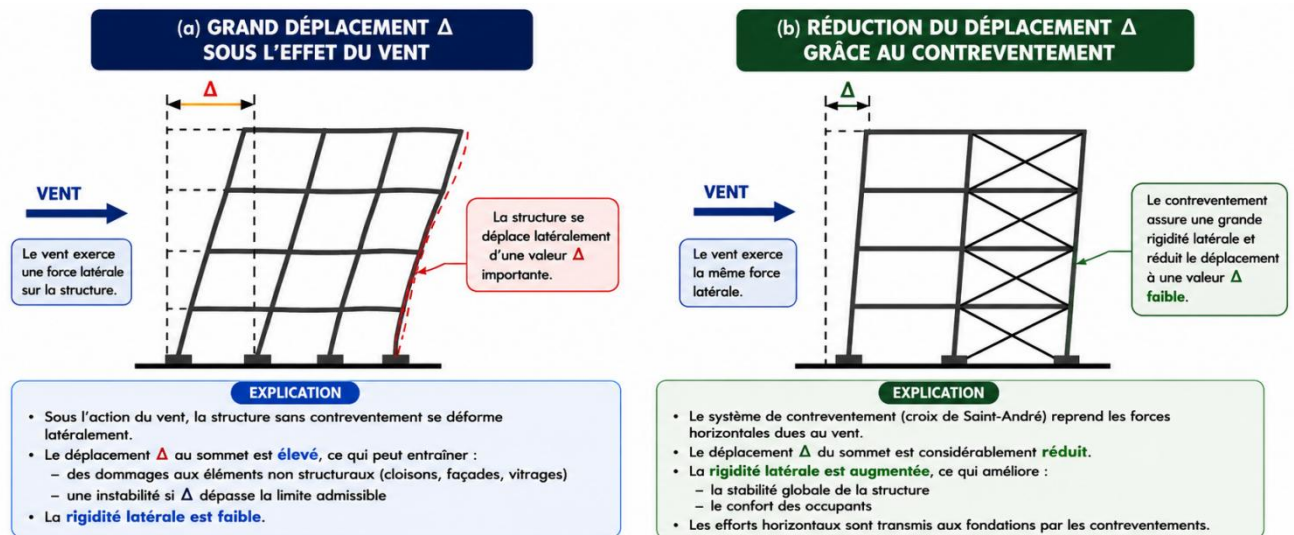


Fig. 4. 10: Grand déplacement Δ sous l'effet de vent, réduction de déplacement Δ grace au contreventement

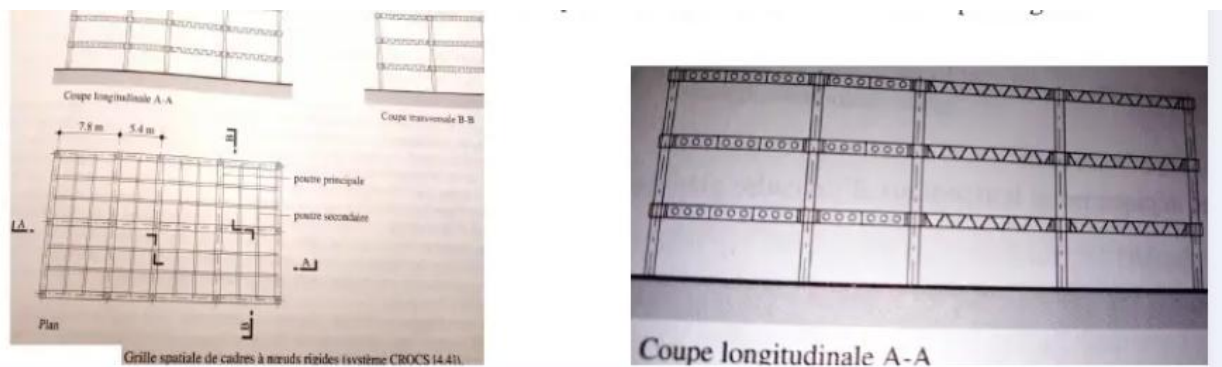


Fig. 4. 11: Influence d'un contreventement sur les déplacements horizontaux d'un cadre plan rigide.

4.5 Ossatures à noyau central

Dans ce cas, le noyau central est suspendu ou soutenu par des câbles ou des barres métalliques tendues. Ce système permet de libérer l'espace au sol tout en maintenant la stabilité du

bâtiment. Ce type de configuration est souvent utilisé dans des structures légères ou dans des bâtiments nécessitant une forme architecturale spécifique.

4.5.1 Structures simples

Ce système consiste en un noyau central (souvent constitué de poteaux métalliques ou de colonnes en acier) autour duquel sont disposés les éléments porteurs. Ce noyau central prend en charge les charges verticales et permet de libérer l'espace autour pour d'autres usages.

Ce type de système est souvent utilisé dans des bâtiments à plusieurs étages ou pour des bâtiments nécessitant une grande stabilité.

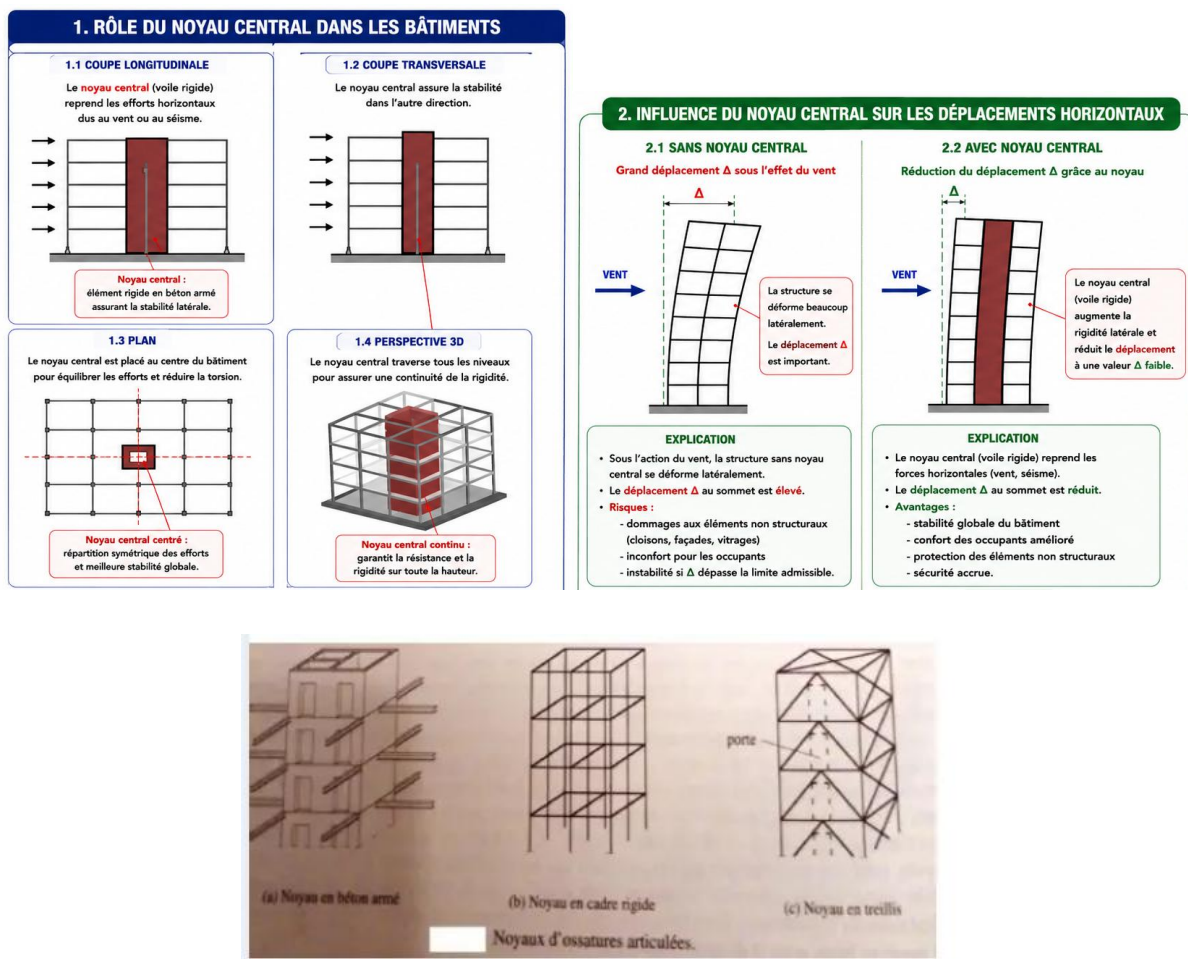


Fig. 4. 12: Structures et système à noyau central

4.5.2 Structures suspendues

Dans ce cas, le noyau central est suspendu ou soutenu par des câbles ou des barres métalliques tendues. Ce système permet de libérer l'espace au sol tout en maintenant la stabilité du bâtiment. Ce type de configuration est souvent utilisé dans des structures légères ou dans des bâtiments nécessitant une forme architecturale spécifique.

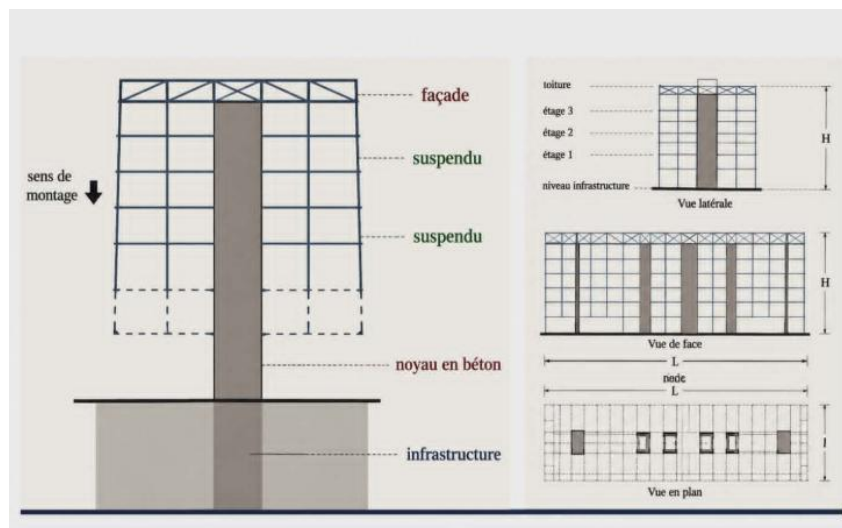


Fig. 4. 13: Structures suspendues

4.5.3 Structure en tubes

Une structure en tube, ou "tube dans un tube", est une configuration où un ou plusieurs tubes métalliques sont utilisés pour la structure principale du bâtiment. Ces tubes peuvent être en acier ou en aluminium, et la structure repose sur des colonnes verticales qui forment un cadre. Ce système est particulièrement utile pour les bâtiments nécessitant une grande stabilité latérale, comme dans les constructions de grande hauteur.

Exemple : Les gratte-ciel ou les bâtiments à forte résistance aux charges latérales utilisent ce type de système, où le noyau central prend les charges verticales, et la structure en tube assure la stabilité contre le vent ou les séismes.

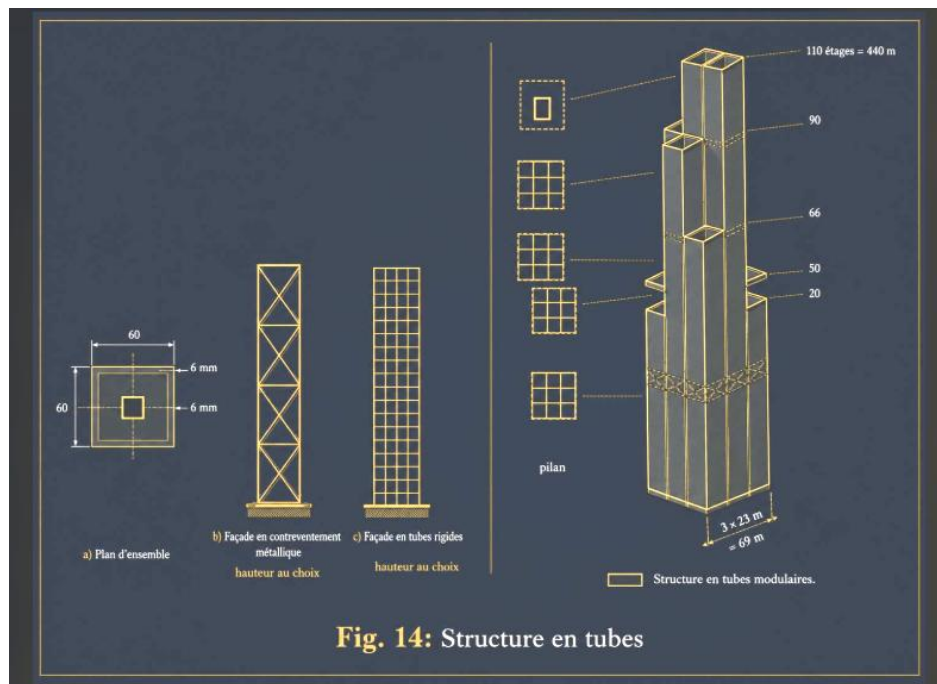


Fig. 4. 14: Structure en tubes

5. LES SYSTEMES PORTEURS PARTICULIERS

Les systèmes porteurs particuliers sont utilisés pour des bâtiments aux configurations spéciales, où des solutions de conception originales sont nécessaires pour répondre à des contraintes spécifiques.

5.1 Structures à treillis alternés

Les treillis alternés sont une forme de structure en treillis où les barres sont agencées de manière à alterner la direction, ce qui permet de répartir efficacement les charges et de réduire le poids de la structure tout en maintenant une grande résistance. Ces structures sont utilisées pour les grands ponts, les toitures à grande portée, ou dans les bâtiments industriels.

Exemple : Des structures de toit pour des halls industriels ou des entrepôts peuvent utiliser ce type de treillis, qui permet de couvrir de grandes surfaces sans supports internes.

On peut considérer que les treillis ont des nœuds fixes, elles sont constituées de :

- Membrane supérieure (arbalétrier)
- Membrane inférieure (entrait)
- Ame de treillis (constituée d'éléments verticaux (montants) et obliques (diagonales)).

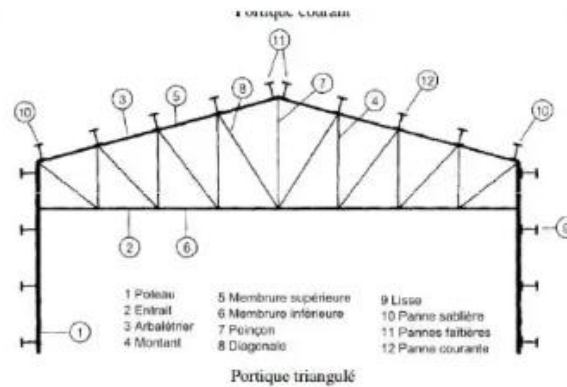


Fig. 4. 15: Portique triangulé

Les fermes treillis sont généralement articulés à leurs appuis car il est délicat de réaliser de bon encastrement avec des treillis (efforts surabondants dans les membrures).

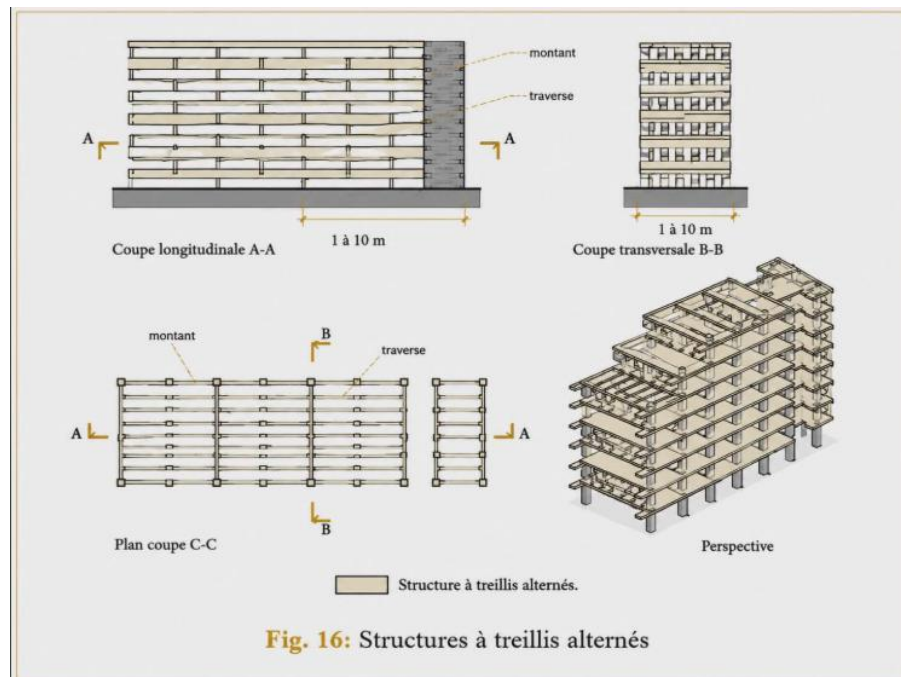


Fig. 16: Structures à treillis alternés

Fig. 4. 16: Structures à treillis alternés

5.2 Bâtiments à portiques

Les bâtiments à portique en acier sont le système de structure le plus courant. Il est largement utilisé dans les bâtiments légers en acier tels que les entrepôts, les ateliers, les hangars, les garages.

Le portique en acier est un système de construction léger ; il s'agit d'un portique à âme pleine ou à treillis comme cadre porteur principal, composé d'acier soudé en forme de H (section égale ou variable), d'acier en forme de H laminé à chaud ou d'acier à paroi mince formé à froid. L'acier à paroi mince formé à froid (en forme de C ou de Z) est utilisé comme pannes et pour les murs ; les tôles ondulées sont utilisées pour les toits et les murs ; la mousse de polystyrène, la mousse de polyuréthane rigide, la laine de roche, la laine minérale, la laine de verre, etc. sont utilisées comme matériaux de préservation et d'isolation thermique, et un système de contreventement approprié est mis en place.

Par rapport à la structure en béton armé. Le portique en acier présente les avantages suivants : légèreté, grande rigidité, conception flexible, force raisonnable et construction pratique.

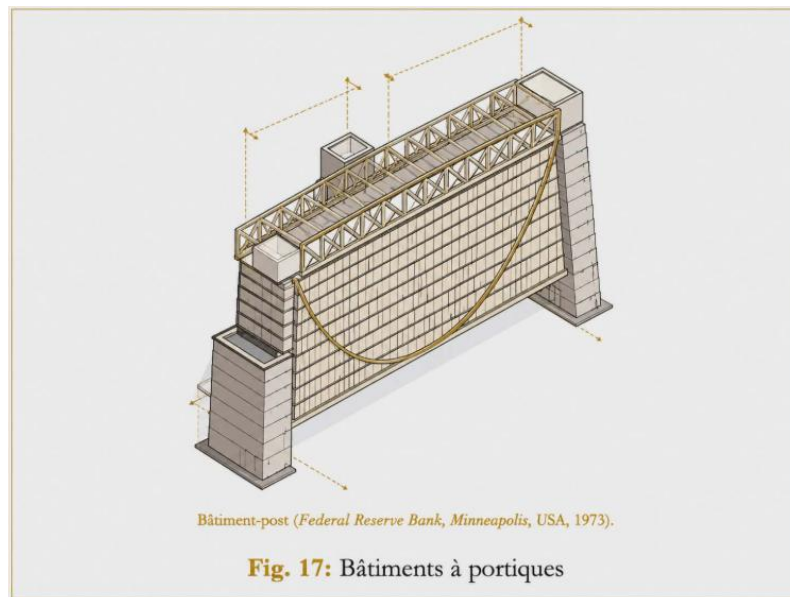


Fig. 4. 17: Bâtiments à portiques

5.3 Bâtiments ponts :

Un bâtiment-pont est un type de structure où une partie du bâtiment (généralement la toiture ou un étage) est suspendue au-dessus d'un espace ouvert. Ce type de système est utilisé dans les bâtiments à grande portée, comme dans les ponts métalliques ou pour la construction de certains grands halls.

Ce système est particulièrement adapté pour des structures ayant besoin de franchir de grandes distances, comme des ponts ou des grandes halles industrielles. Les poutres principales sont souvent renforcées avec des câbles ou des treillis pour augmenter leur portée sans nécessiter de supports intermédiaires.

5.4 Structures en arc ou voûte :

Les arcs métalliques ou les voûtes sont utilisés pour soutenir de grandes charges tout en créant une forme architecturale impressionnante. Ces systèmes peuvent être utilisés pour des bâtiments à large portée, comme les stations de train ou les grandes salles de concert. L'arc permet de transférer les charges de manière efficace tout en permettant de grandes ouvertures.

6. CONCLUSION

Les systèmes porteurs des bâtiments métalliques constituent l'ossature principale des ouvrages industriels et des constructions à grande portée. Leur rôle est d'assurer la transmission des charges verticales et horizontales vers les fondations tout en garantissant la stabilité, la rigidité et la sécurité de l'ensemble de la structure. Grâce aux excellentes propriétés mécaniques de l'acier, ces systèmes permettent la réalisation de bâtiments légers, résistants et adaptés à des portées importantes impossibles à atteindre avec de nombreux autres matériaux.

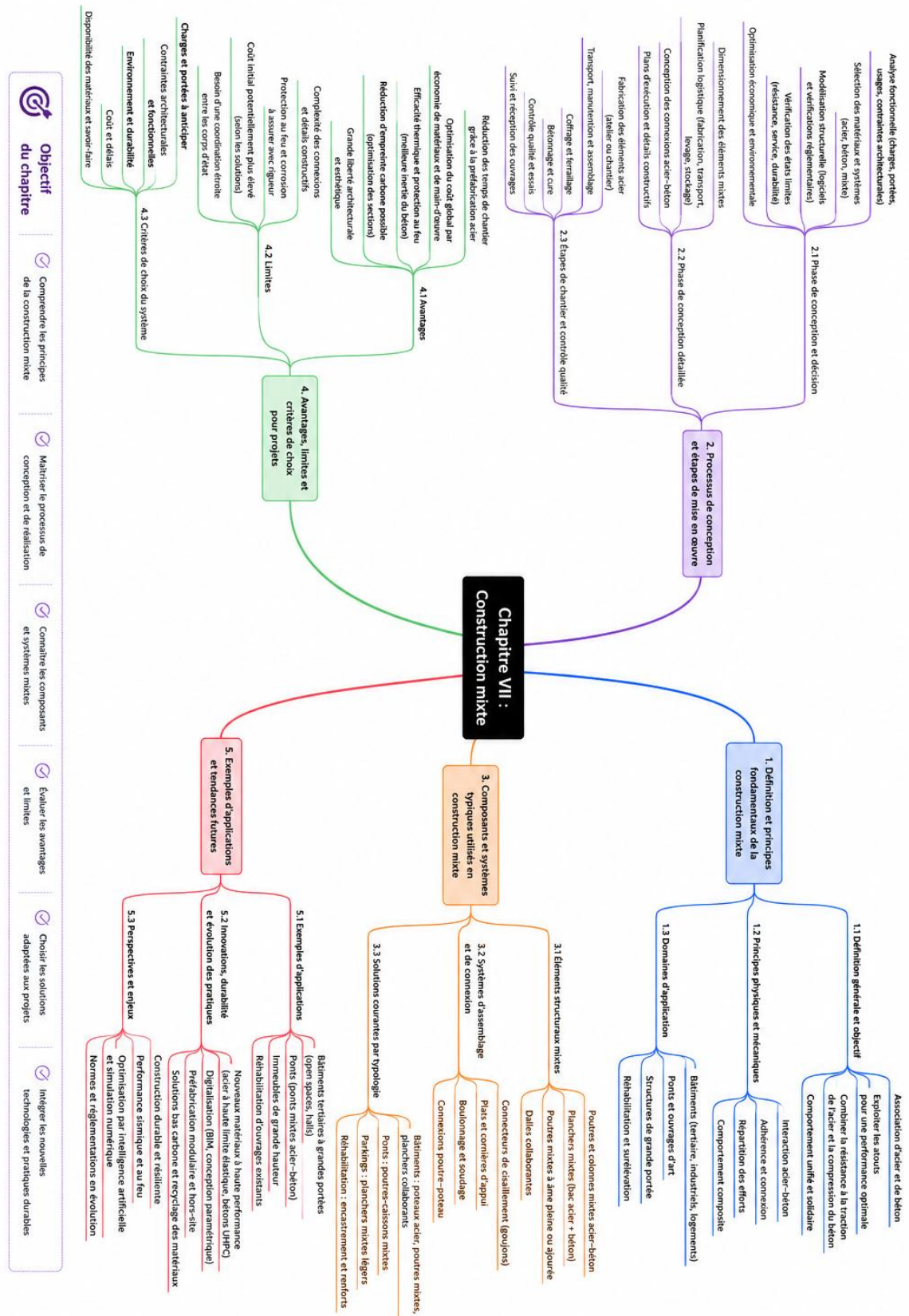
Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les différents éléments composant les bâtiments métalliques, notamment les poteaux, les poutres, les portiques, les contreventements, les pannes et les structures secondaires. L'analyse des différents systèmes porteurs a montré que le choix d'une solution structurale dépend principalement de la portée à franchir, des charges appliquées, des exigences architecturales et des conditions d'exploitation de l'ouvrage.

Les portiques à âmes pleines, les cadres rigides, les structures à noyau central, les structures tubulaires ainsi que les systèmes particuliers tels que les treillis, les bâtiments-ponts et les structures en arc ou en voûte offrent chacun des avantages spécifiques répondant à des besoins techniques précis. Ces solutions permettent d'optimiser le comportement mécanique des structures tout en assurant une utilisation rationnelle des matériaux et une grande flexibilité dans la conception architecturale.

Par ailleurs, les bâtiments métalliques présentent de nombreux atouts tels que la rapidité de construction, la préfabrication en atelier, la possibilité de démontage et d'extension, ainsi qu'une excellente adaptation aux grandes portées et aux espaces libres de poteaux intermédiaires. Ces caractéristiques expliquent leur large utilisation dans les halls industriels, les hangars, les marchés couverts, les équipements sportifs et les infrastructures modernes.

Ainsi, la maîtrise des systèmes porteurs métalliques constitue une compétence fondamentale pour l'ingénieur en génie civil et en construction métallique. L'évolution constante des techniques de calcul, des procédés de fabrication et des matériaux permet aujourd'hui de concevoir des structures toujours plus performantes, économiques et durables. Face aux exigences croissantes de sécurité, de fonctionnalité et de développement durable, les systèmes porteurs métalliques continueront à jouer un rôle majeur dans la réalisation des bâtiments industriels et des ouvrages innovants de demain..

Chapitre 5 : Construction Mixte



1. INTRODUCTION

Dans le domaine d'ingénierie, l'ingénieur dispose de plusieurs types de matériaux (béton, acier, bois, plastique, etc.). Aussi, l'ingénieur en Génie Civil est sensé savoir dimensionner les différents types de structures porteuses :

2. Types des structures

2.1 Structures en Béton armé



Fig. 5. 1: La grande mosquée d'Alger



Fig. 5. 2: Le barrage des Trois-Gorges en Chine

Avantages : Peu coûteux, fluide-durable-facilité –Résistance aux feux et agent extérieur-source naturel-disponible

Inconvénients : Poids propre élevé - faible isolation thermique - destruction difficile – Résistance aux séismes

2.2 Les Pierres



Fig. 5. 3: Glatasaray / قلعة سراي



Fig. 5. 4: Blue Mosque/المسجد الأزرق

Avantages : Solide-Durable-Isolant- incombustible - Non polluant- recyclable –Noble - Beauté et style

Inconvénients : Lourdeur-Non disponibilité-Durée Manque de technicité-perméabilité-radioactive

2.3 Structures en acier



Fig. 5. 5: La tour Eiffel, France



Fig. 5. 6: Empire State Building, New York

Avantages : Leger-peu coûteux- rapidité-démontable durable-facilité –Résistance aux séismes

Inconvénients : Résistance au feux- corrosion-autre matériaux-R aux agents ex-Non disponible-non économique

2.4 Structures en Bois



Fig. 5. 7: « Globe de la science »
Neuchâtel, Suisse 2004



Fig. 5. 8: «Construction préférées
au Canada et Pays Scandinave

Avantages : Naturel, écologique, durable-non polluant- ancien et moderne –Résistance aux séismes-ventilation-isolation thermique-Beauté et style ;

Inconvénients : Résistance aux feux - Faible inertie thermique sensible à l'humidité -fragile-entretien régulier

2.5 Terre Crue



Fig. 5. 9: Djenné Mosque -Bamako -



Fig. 5. 10: Bam Citadel - Iran

Avantages : Naturel-Durable-Isolant- incombustible - Non polluant- recyclable -peu coûteux-facilité

Inconvénients : Technicité-perméabilité- radioactive Faible Résistance aux séismes –non confortable

2.6 Roche/sculpture



Fig. 5. 11: Ville des gènes. Turkey

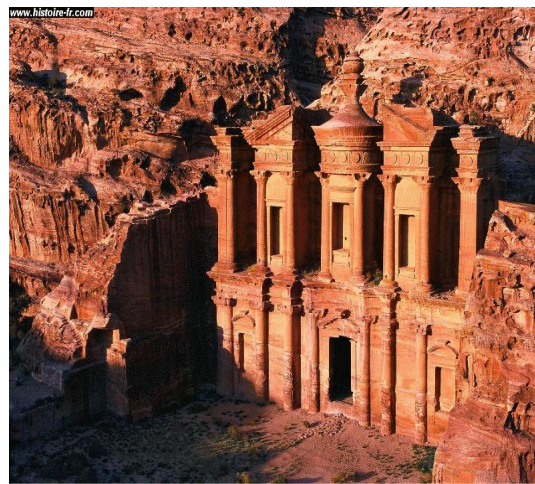


Fig. 5. 12: El Petra. Jordan- البتراء

Avantages : Naturel-Durable-Incombustible-Esthétique- économique

Inconvénients : Manque des sites-conditions de vie –Délais de réalisation-Non confortable-
Manque de technicité-

2.7 Déchets



Fig. 5. 13: Maisons écologiques faites de déchets - Texas



Fig. 5. 14: Maison construite par des déchets -Université de Brighton-England

Avantages : Economique-Ecologique-Esthétique-Résistance aux siesmes

Inconvénients : Maladies- Problème de traitement –comportement inconnue-manque de moyen

2.8 Matériaux Composites

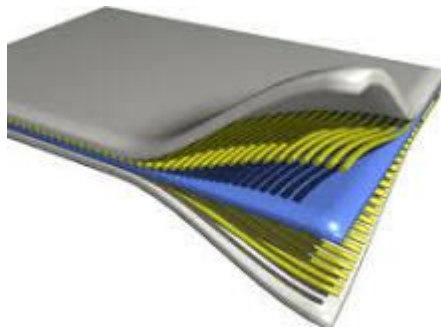


Fig. 5. 15: Matériaux composite

Avantages : Résistance- Ductilité- Légèreté – Multi-utilisation-

Inconvénients : Disponibilité –Economie-Quantité

3. DEFINITION DES STRUCTURES MIXTES

La construction mixte est la réalisation d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en associant un matériau possédant de bonnes caractéristiques en traction (généralement des poutrelles en acier) avec du béton. L'idée de la construction mixte provient d'une réflexion sur l'optimisation des matériaux dans notre élément de structure. En effet, les porteurs horizontaux, généralement soumis à de la flexion simple, subissent des contraintes de traction en fibre inférieure et des contraintes de compression en fibre supérieure. Le béton possédant une très mauvaise résistance à la traction, il a donc été nécessaire de l'associer avec d'autres matériaux afin de lui permettre de fonctionner en flexion.

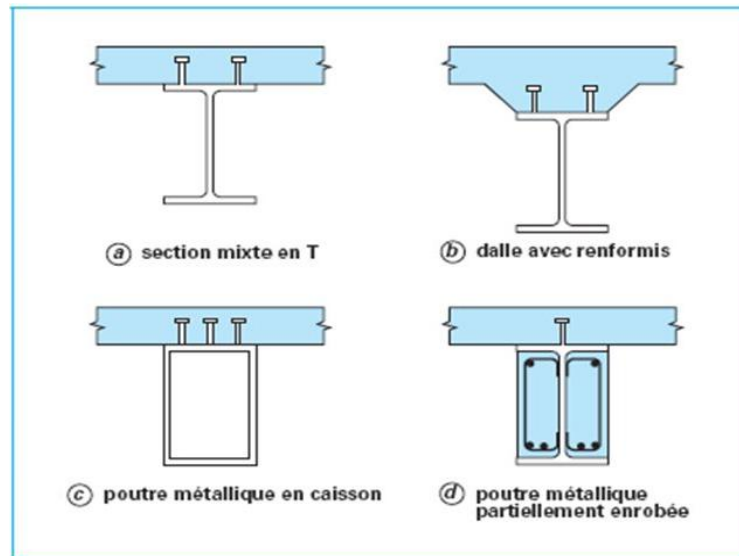


Fig. 5. 16: Renforcement de la nappe inférieure du plancher par l'utilisation des profilés (poutres mixtes)

D'une manière générale, une structure peut être définie comme mixte si, au niveau de la plupart de ses éléments (poutres, poteaux, assemblages, dalles), elle associe **deux matériaux de natures et de propriétés différentes**, ici l'**acier** et le **béton**, avec l'objectif de tirer le meilleur parti possible de cette association, tant sur le plan du fonctionnement structural que sur celui du coût de construction. Au premier abord, l'idée d'utiliser dans un élément mixte, par exemple une poutre mixte de section classique, d'une part le béton pour reprendre un effort de compression, d'autre part l'acier pour reprendre un effort de traction et un effort tranchant, ne serait pas, à elle seule, très originale par comparaison au béton armé traditionnel.

On distingue principalement deux types de structures mixtes



Fig. 5. 17: Structure mixtes en acier-bois



Fig. 5. 18: Pont mixte en acier béton

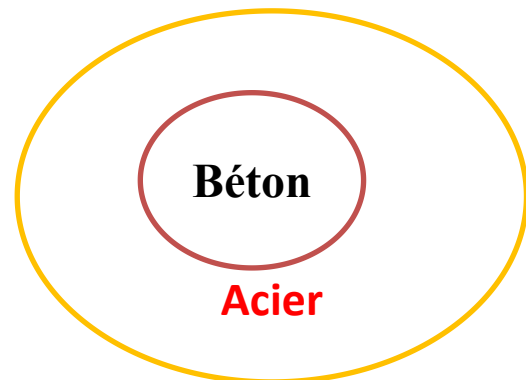
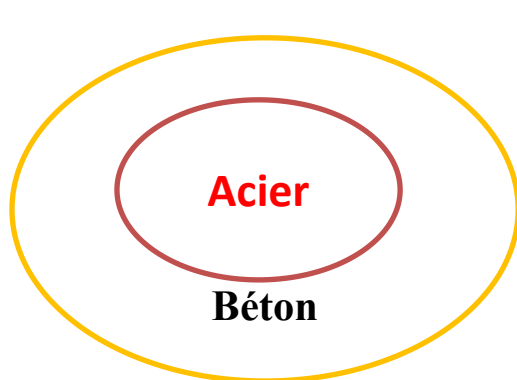
Il convient, en particulier, de **distinguer les structures mixtes des structures hybrides**, parfois appelées improprement « **mixtes** », composées d'éléments homogènes de matériaux

différents, par exemple un bâtiment avec un noyau en béton armé sur lequel prend appui une charpente constituée exclusivement de poutres et poteaux en acier.

4. COMPLEMENTARITE ENTRE LE BETON ET L'ACIER

La comparaison entre les propriétés des deux matériaux Acier et Béton, ainsi de leurs avantages et inconvénients, une structure mixte doit sa capacité portante à la collaboration structurelle entre l'acier et le béton qui exploite les caractéristiques favorables de ces matériaux de façon optimale.

Béton		Acier	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
- Résistance aux feux - Résistance à la compression	- Poids élevé - Mauvaise résistance à la traction	- Bonne résistance à la traction et compression - Poids léger	Résistance aux feux
- Durabilité	- Résistance aux séisme	- Résistance aux séisme	- Problème de corrosion



- Le béton présente une bonne résistance à la compression, tandis que l'acier est mieux adapté pour transmettre les efforts de la traction
- Le béton recouvre l'acier et le protège de la corrosion, ainsi que le béton est caractérisé par sa bonne durabilité
- Le béton constitue une bonne protection contre l'incendie, et grâce à l'inertie thermique du béton qui empêche la transmission de la chaleur et permet d'absorber l'échauffement rapide de l'acier.
- L'élancement des éléments en acier les rend sensibles au flambement (phénomène de second ordre), tandis que la présence du béton limite l'apparition de ces formes d'instabilité de second ordre.

- Grâce à sa ductilité, l'acier offert à la structure mixte une très bonne capacité de déformation plastique.

5. LES ELEMENTS STRUCTURAUX

5.1 Poteaux Mixtes

La capacité portante des poteaux mixtes est largement dominée par leurs parties métalliques. Ils sont généralement utilisés en présence d'efforts normaux élevés pour avoir des sections de faibles dimensions. Ils peuvent être préparés en atelier, le temps de construction peut être fortement réduit par rapport à la construction sur place en béton armé. L'autre avantage principal des poteaux mixtes par rapport aux poteaux métalliques est qu'ils présentent une plus grande résistance à l'incendie.

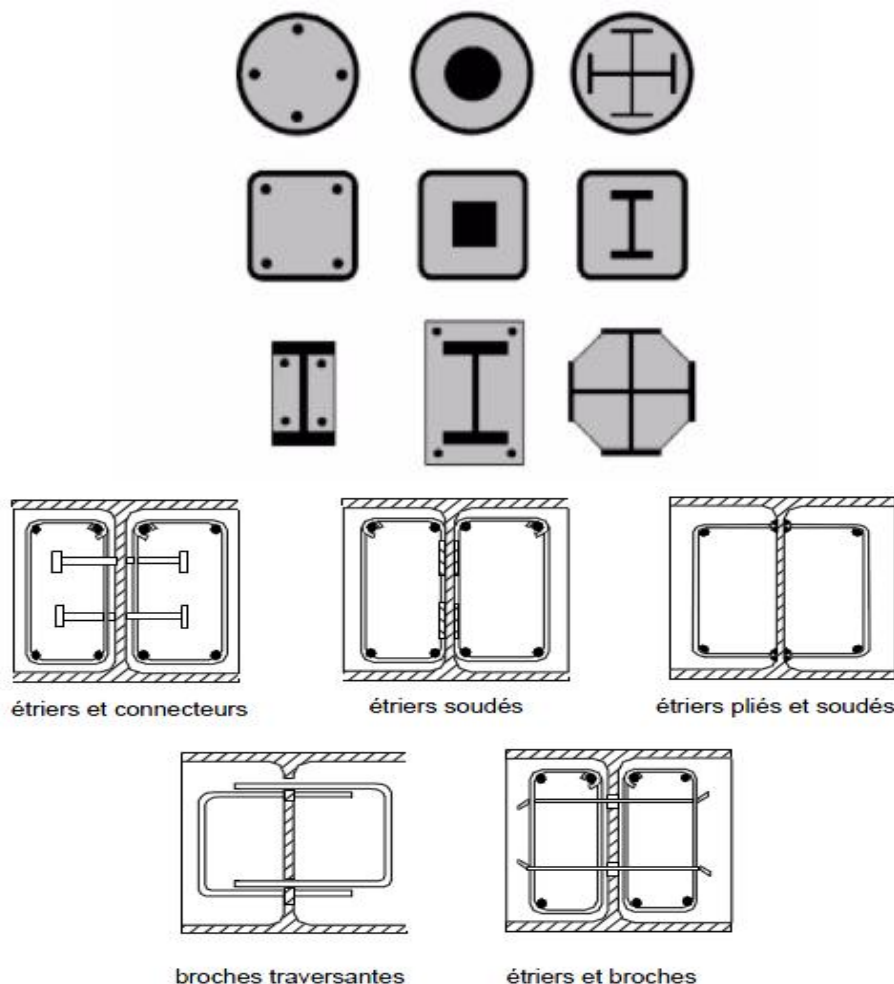


Fig. 5. 19: Exemples des poteaux mixtes

5.2 Poutres Mixtes

Les poutres supportant les dalles et conduisant les charges aux poteaux sont le deuxième type d'élément du plancher. Par l'intermédiaire des connecteurs de cisaillement, le béton de la dalle

est comprimé dans les zones de flexion positive de la poutre ; Elles présentent l'avantage de combiner une rigidité relativement élevée avec une grande capacité de déformation.

Les poutres mixtes se composent de trois composantes :

- Une profile en acier ;
- Une semelle en béton, se présente habituellement sous forme d'une semelle en béton à la partie supérieur de la section
- Un connecteur, la connexion est assurée le plus souvent par des goudjons connecteurs.

La connexion est d'une importance primordiale pour la transmission de l'effort de cisaillement longitudinale, appelé effort rasant, à l'interface entre le profilé en acier et la partie en béton. Les connecteurs sont de deux types rigides et souples, ces deux types se distinguent par une capacité de déformation très différente : faible pour les connecteurs rigide et élevé pour les connecteurs souples.

• Les connecteurs

Il existe plusieurs types de connecteurs dont certains sont illustré à la figure suivante. Les goudjons à tête sont les connecteurs les plus utilisés en Euro-code occidentale.

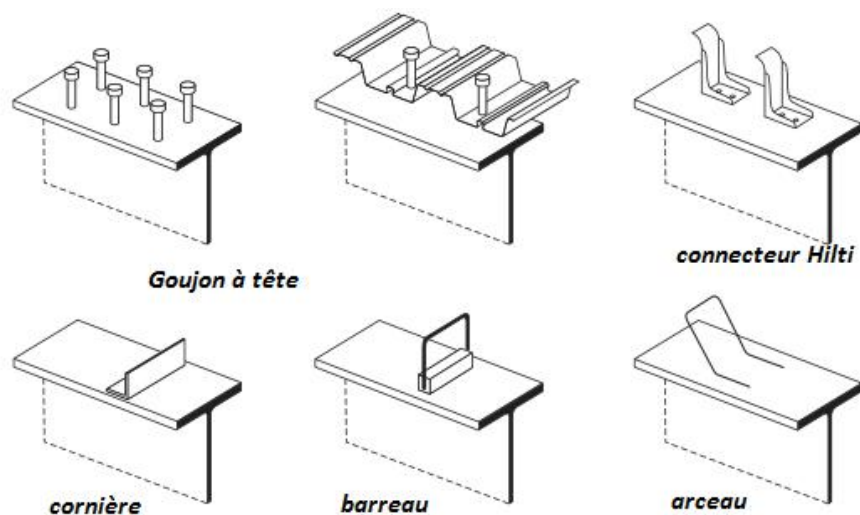


Fig. 5. 20: Types de connecteurs

5.3 Dalles Mixtes

Une dalle mixte comporte une tôle mince profilée en acier conçue pour développer une collaboration structurale efficace avec le béton du plancher qu'elle va recevoir.

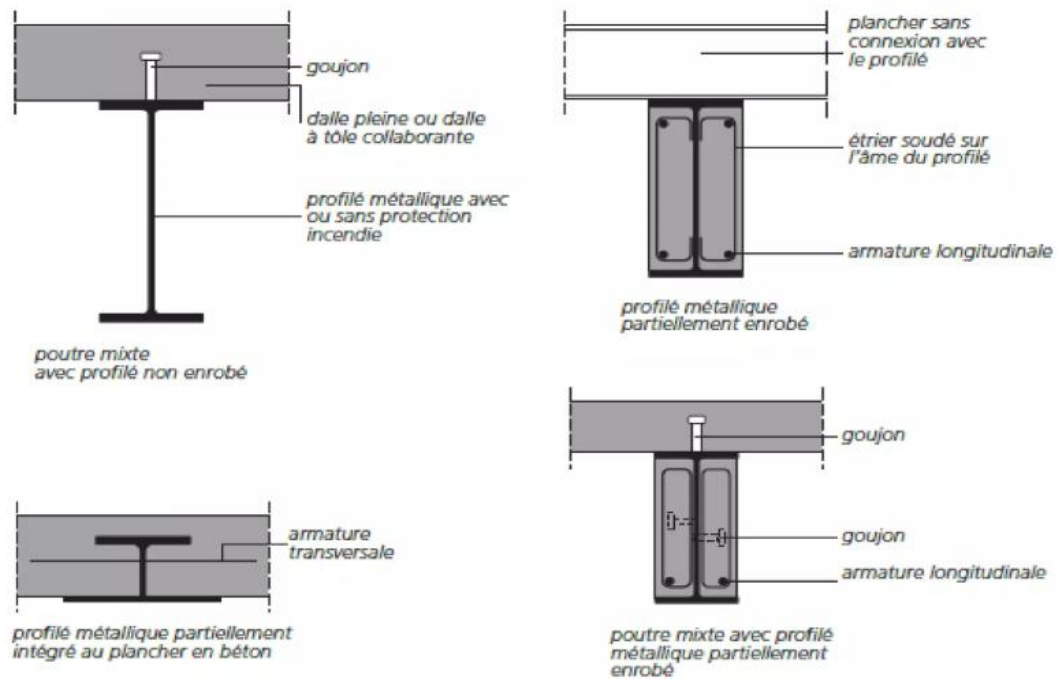


Fig. 5. 21: Quelques types des poutres mixtes

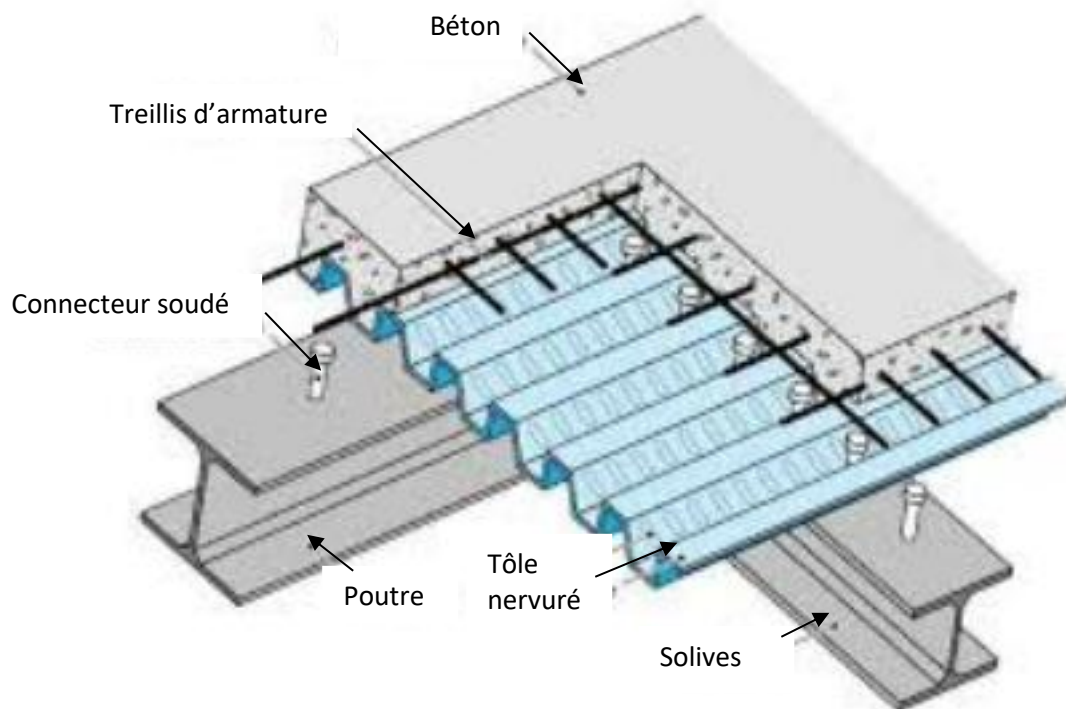


Fig. 5. 22: Plancher à tôle profilée collaborant

Les tôles profilées assurent diverses fonctions :

- Une surface de travail lors de la construction,
- Elles servent de coffrage lors du bétonnage du plancher,

- Elles jouent le rôle d'armature inférieure pour le béton de la dalle.

6. DOMAINE D'UTILISATION

Le choix de ce type de procédé est motivé pour



Fig. 5. 23: Ponts type bipoutres mixte Acier-Béton



Fig. 5. 24: Structure de grand hauteur mixte

- Bâtiments à plusieurs étages, et poteaux mixtes plus élancées.
- Plus grandes portées (20m) parkings, salle de spectacle.
- Dalles mixtes plus minces.
- Travaux Publics : ponts type bipoutres avec des travées de 60 à 80 m.
- Ouvrage résistant au vent.
- Modification des structures pendant la vie de la construction.
- Plus de possibilité dans la conception des structures.
- Modification des équipements sans perturbation de la vie des occupants.

7. COMPARAISON D'ELEMENTS MIXTES ET EN BA

Généralement, les dimensions des sections des éléments mixtes sont bien inférieures à celles des éléments correspondant en béton armé ou en acier seul.

Le tableau suivant montre les tailles des poteaux et des poutres mixtes relativement importantes avec leur équivalent en béton armé pour des conditions de chargement identiques

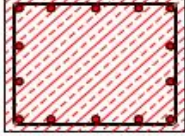
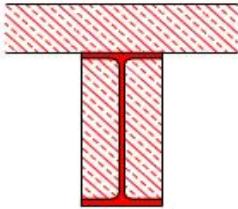
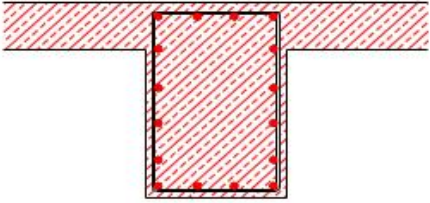
	Mixte	Béton armé
Poteau		
Dimensions [cm]	70 / 70	80 / 120
Poutre		
Dimensions [cm]	160 / 40	160 / 120

Fig. 5. 25: Comparaison des dimensions des poutres et poteaux, mixtes et en béton armé

Conclusion

La construction mixte représente aujourd'hui l'une des solutions structurelles les plus performantes dans le domaine du génie civil. Elle repose sur l'association intelligente de deux matériaux aux propriétés complémentaires, l'acier et le béton, afin de tirer profit des avantages de chacun tout en limitant leurs inconvénients respectifs. Cette complémentarité permet d'obtenir des structures à la fois résistantes, durables, économiques et adaptées aux exigences des constructions modernes.

L'étude de ce chapitre a montré que le béton, particulièrement efficace en compression et offrant une excellente résistance au feu, se combine parfaitement avec l'acier, reconnu pour sa grande résistance à la traction, sa légèreté et sa ductilité. La collaboration de ces deux matériaux améliore le comportement global des ouvrages, augmente leur capacité portante et réduit les risques d'instabilité tels que le flambement.

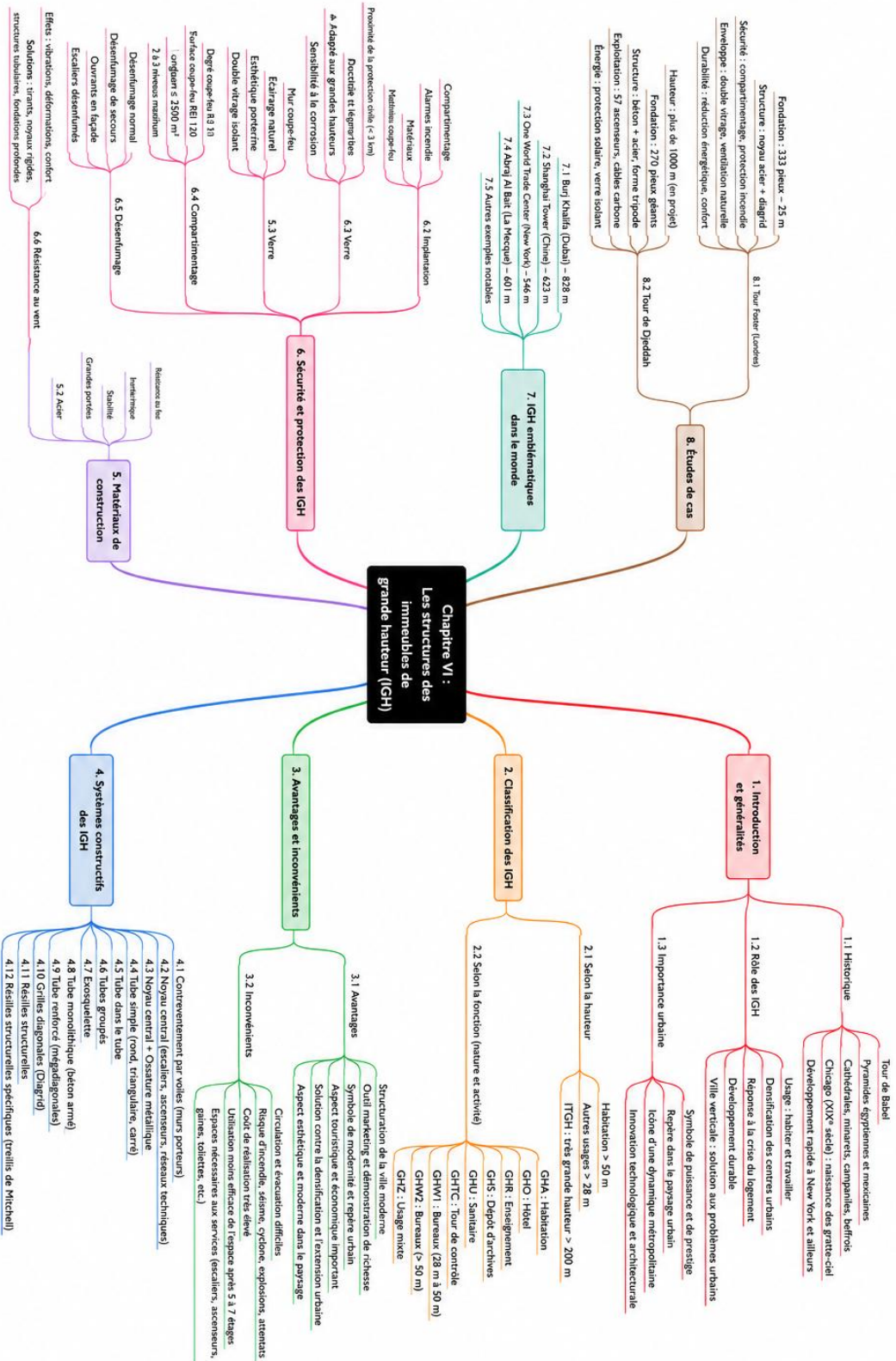
Les principaux éléments structuraux des constructions mixtes, notamment les poteaux mixtes, les poutres mixtes et les dalles mixtes, illustrent parfaitement cette synergie. L'utilisation des connecteurs de cisaillement assure une transmission efficace des efforts entre l'acier et le béton, garantissant ainsi un fonctionnement commun de l'ensemble de la structure.

Par ailleurs, les structures mixtes trouvent de nombreuses applications dans les bâtiments à plusieurs étages, les ouvrages de grande portée, les parkings, les salles de spectacle, les ponts et les constructions soumises à des sollicitations importantes dues au vent ou aux séismes. Elles offrent également une grande flexibilité architecturale et facilitent les adaptations ou transformations futures des ouvrages.

Enfin, la comparaison avec les structures traditionnelles en béton armé montre que les solutions mixtes permettent souvent de réduire les dimensions des éléments porteurs, d'alléger les structures, de diminuer les délais de construction et d'optimiser l'utilisation des matériaux. Ainsi, la construction mixte constitue une réponse efficace aux exigences actuelles de performance, de sécurité, de durabilité et d'économie, ce qui explique son développement croissant dans les projets de bâtiments et d'infrastructures à travers le monde.

De plus, l'évolution des méthodes de calcul, des techniques de préfabrication et des normes de conception favorise une utilisation toujours plus importante des structures mixtes dans les projets contemporains. Grâce à leur excellent compromis entre résistance mécanique, rapidité d'exécution et optimisation des ressources, les constructions mixtes s'imposent aujourd'hui comme une solution d'avenir pour répondre aux défis techniques, économiques et environnementaux du secteur de la construction.

Chapitre 6 : Les structures des immeubles de grande hauteur (IGH)



1-Introduction

A travers l'histoire et dans pratiquement toutes les cultures et les civilisations on observe une tendance commune à la construction vers le ciel, et souvent pour des raisons de grandeur et des fins de prestige. Ces bâtiments en hauteur ont pu prendre des formes diverses depuis Tour de Babelé aux pyramides égyptiennes ou mexicaines jusqu'aux clochers des cathédrales et les minarets des mosquées passant par les campaniles et les beffrois.

La grande aventure de ces bâtiments de grande hauteur contemporaine commence d'une façon timide et réelle à Chicago au l'Etats Unis au 19 siècle. Et dans cette ville le nombre des étages des édifices augmentèrent très vite, et les autres villages des états unis prenant rapidement cette démarche à partir de l'expérience à Chicago comme à la ville de New York.

L'usage des hautes bâtiments a changé à travers le temps dans l'antiquité ces bâtiments jouant un rôle des monuments dans le domaine sacré, mais actuellement sont des espace pour l'usage quotient pour habiter et travailler.

Aujourd'hui avec les problèmes de la densification des centre-ville et la crise des logements et les enjeux du développement durable, donc ces facteurs qui oblige une évolution du bâti et un développement dans le système urbain de la ville moderne , la verticalité ou la ville verticale qui constitue des tour et des gratte-ciel qui s'appelle les IGH « les immeubles a grande hauteur» est considéré comme une des solutions contre les problèmes des ville moderne .

Les immeubles a grande hauteur « IGH » sont des monuments au quelle l'architecture est signe de puissance de pays dont lequel il se trouve, c'est ainsi qu'est né le rêve de construire des tours toujours plus haute et plus imposantes, car les technologies d'aujourd'hui permette de construire encore plus haut et celles de demain permettront peut-être de construire dans les endroits encore imaginables. Plusieurs IGH actuelle dépassent les 500m, dont le plus haut actuellement 828m, mais les innovations pouvant arriver jusqu'à un kilomètre d'hauteur, même parfois dans des zones non confortables comme la mer ou bien le ciel. Par sa forme, la tour joue un rôle a plusieurs échelles dans la ville, au rapport avec l'espace publique qui l'entoure immédiatement, s'ajoute un rapport au paysage urbain dans sa globalité, liée à l'émergence de ce type de construction, et à sa position dans le tissu urbain, un repère dans le paysage urbain et un symbole d'une dynamique métropolitaine..



Fig. 6. 1 : Historique des IGH dans le monde

2. Classification des IGH :

Selon les dispositions de l'article R122-2 de Code de la construction et de l'habitation française, Les IGH sont classés selon deux principaux critères :

Le classement selon la hauteur :

- 50 m pour les immeubles à usage d'habitation.
- 28 m pour tous les autres immeubles.

Le classement selon la nature et l'activité :

GHA : pour les immeubles à usage d'habitation.

GHO : pour les immeubles à usage d'hôtel.

GHR : pour les immeubles à usage d'enseignement.

GHS : pour les immeubles à usage de dépôt d'archives.

GHU : pour les immeubles à usage sanitaire.

GHTC : immeubles à usage de tour de contrôle.

GHW1 : pour les immeubles à usage de bureaux de hauteur caractéristique supérieure à 28 m et au plus égale à 50 m. (type assez répandu).

GHW2 : pour les immeubles à usage de bureaux de hauteur caractéristique Supérieure à 50 m. (le plus répandu)

GHZ : pour les immeubles à usage mixte.

ITGH : immeuble de très grande hauteur Constitue un immeuble de très grande hauteur tout corps de bâtiment dont le plancher bas du dernier niveau est situé à plus de 200 mètres par rapport au niveau du sol le plus haut utilisable pour les engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie.

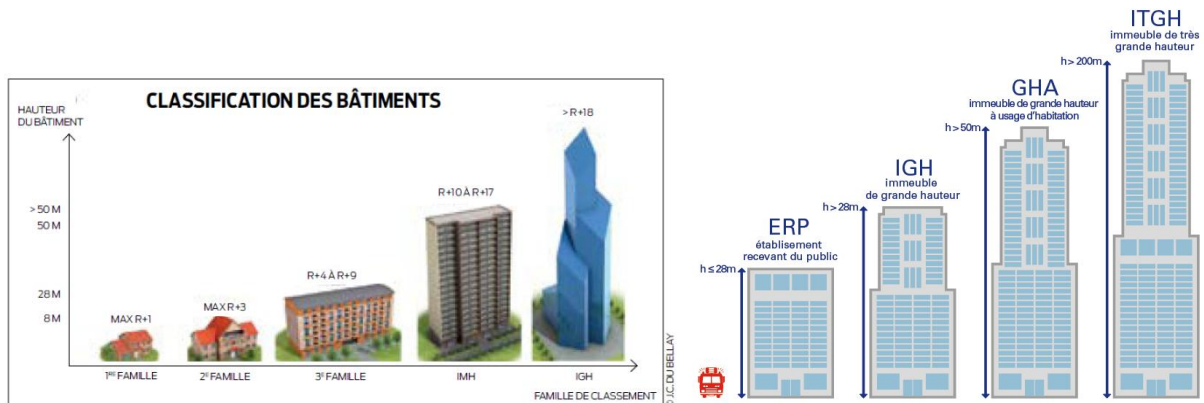


Fig. 6. 2 : Classification des batiments IGH

3. Avantages et inconvénients des IGH :

3.1 Les Avantages :

- ✓ Les IGH jouent un rôle primordial dans la structuration de la ville modern
- ✓ Les IGH sont des Outils marketing et une Démonstration de richesse, de capacité d'investissement, les gratte-ciel sont aussi une démonstration de maîtrise technologique, de dynamisme du tissu industriel et économique local.
- ✓ Un symbole de la ville moderne et généralement utilisé comme un repère ou un point d'appel dans cette ville.

- ✓ Les IGH donnent un aspect touristique et économique important.
- ✓ Les IGH sont considérés comme des solutions contre la densification et l'extension des villes.
- ✓ Un aspect esthétique et moderne dans le paysage urbain.

3.2 Les Inconvénients :

- ✓ Les problèmes de circulation des personnes - posant problème pour leur évacuation et l'accès des secours.
- ✓ Le risque des incendies et des aléas naturels comme le séisme, cyclone et Les explosions et les attentats.
- ✓ Le Coût trop élevé de la réalisation de ces immeubles.
- ✓ Utilisation moins efficace de l'espace après 5 à 7 étages dus à des espaces nécessaires aux services (escaliers, ascenseurs, gaines de ventilation, gaines électriques, toilettes, etc.).

4. Système constructif :

Les IGH sont traditionnellement construits sous forme d'une tour monolithique organisée autour d'un noyau central comprenant en premier lieu les voies de circulation verticale (escaliers, ascenseurs) et les conduites (eau, réseaux électriques, réseaux de communication...). La structure porteuse peut être concentrée dans ce noyau central, ou répartie sur des piliers. À l'origine, les IGH avaient une structure en acier, les murs n'étant pas porteurs. Certains édifices ont été conçus autour d'une armature entièrement métallique. Les systèmes constructifs peuvent être variables d'un bâtiment à un autre, selon la disponibilité des matériaux de constructions dans le pays concerné, Et aussi par l'aspect extérieur (les façades).

4.1 Système de contreventement par voile :

Une structure contreventée par murs est composée d'éléments plans verticaux, formant tout ou partie des murs extérieurs et dans beaucoup de cas des murs intérieurs par la même occasion. Ils résistent à la fois aux charges verticales et horizontales et sont le plus souvent réalisés en béton.

Le système de contreventement par mur faisant intervenir le poids propre des composants de structure (généralement du béton), devient normalement inefficace pour des bâtiments de plus de 15 à 30 étages.

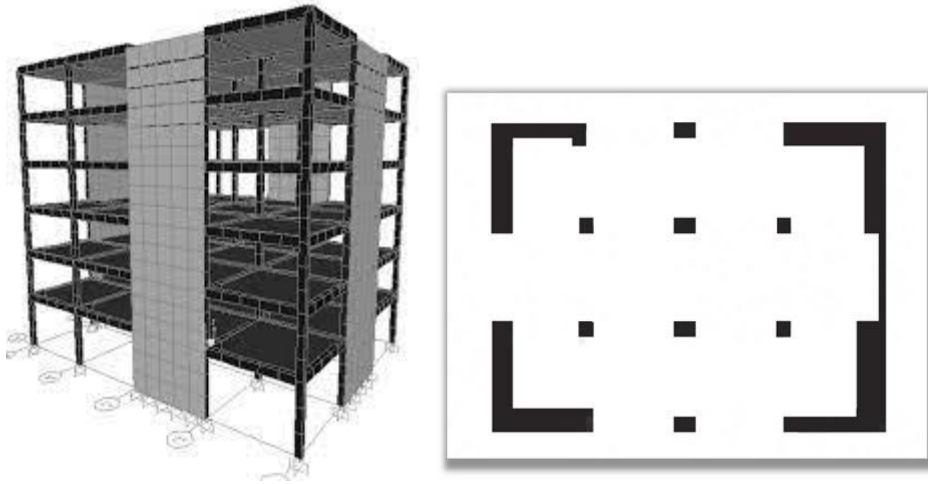


Fig. 6. 3 : Volumétrie d'un immeuble avec système de contreventement par voile
(Contreventement par voile)

4.2 Système noyaux centrale:

La structure en «noyaux centrale» peut être conçue comme une optimisation du tube simple intérieur; un noyau central tubulaire (béton ou acier, conséquent au vue des torsions dues aux «stabilisateurs», pouvant aller jusqu'à des murs d'un mètre d'épaisseur) duquel partent des niveaux structurels rigides composés de poutres en treillis qui sont ensuite reliées à leur périphérie par des montants capables de reprendre compression (façade sous vent) et traction (Façade au vent), soit une série de poteaux serrés, soit des «méga-colonnes».

Ce concept structurel consiste à mettre les noyaux tubulaires en périphérie, puis les connecter par des structures horizontales constituant ensemble une «mégastructure». L'ensemble se comportant en quelque sorte comme un «méga-tube rigide». Cette stratégie permet de libérer de structures le centre du bâtiment, mais fait, selon la typologie, apparaître les circulations verticales en façade, le lieu le plus prisé du point de vue luminosité. Ce renversement typologique vis-à-vis du noyau centré est porteur d'une forte potentialité architecturale, les plateaux étant exempts de grands éléments immobiles, le plan est totalement libre entre les noyaux, permettant autant d'aménager les niveaux en fonction des volontés spatiales du projet que de créer des atriums et autres variations en coupe.

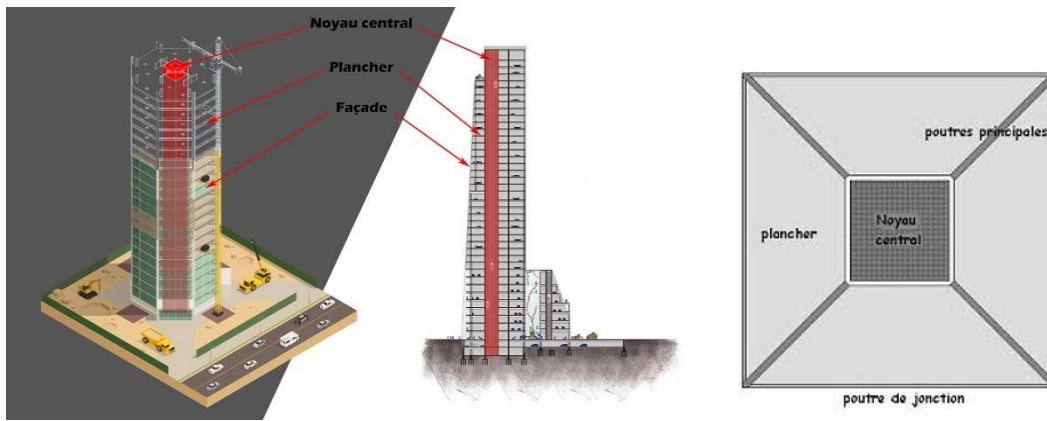


Fig. 6. 4: Principe de IGH a noyau centrale en béton et schéma du noyau central.

4.3 Noyau central -ossature métallique :

L'ossature extérieure entoure la totalité de l'édifice et est reliée aux éléments horizontaux des planchers par des amortisseurs viscoélastiques, permettant d'absorber les effets du vent. Cette structure extérieure est préfabriquée puis solidarisée avec des boulons à haute résistance.

4.4 Tube simple périphérique :

Le concept de tube simple, introduit par Fazlur Khan, consiste en une structure périphérique ayant à elle seule la capacité de reprendre les efforts horizontaux. Celle-ci peut parfois se coupler à un noyau n'ayant qu'une fonction de porteur vertical et de concentration de fonctions.

Ce concept structurel à l'avantage d'offrir l'autonomie de plan, la typologie à noyau central n'étant pas obligatoire, mais ne profite pas de la collaboration conjointe avec une structure interne pour reprendre les efforts horizontaux.

Il faut également distinguer, pour tout concept, trois types de tubes:

1. **Le tube à section ronde:** la rigidité est tributaire de l'homogénéité du «développement » du tube, chaque vide étant une faiblesse.
2. **Le tube à section triangulaire:** effet géométrique, la spatialité de la triangulation implique la rigidité, la stabilité globale n'implique pas l'homogénéité mais la rigidité de chaque face dans son plan.
3. **Le tube à section carrée:** ne bénéficie pas d'une rigidité géométrique et dépend essentiellement d'une conception structurelle pour la rigidité perpendiculaire et la torsion.

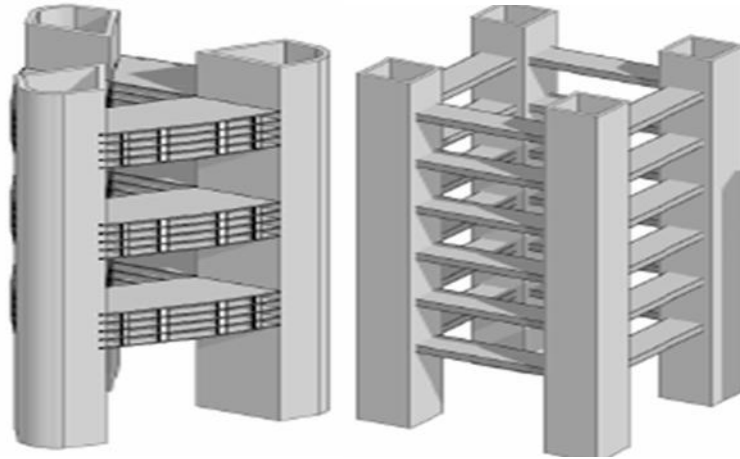


Fig. 6. 5 : Quelques types des tubes

4.5 Tube dans le tube:

La structure «Tube dans le tube» consiste en un tube extérieur constitué par la structure périphérique et un tube intérieur sous forme de noyau, les deux structures étant connectées par les dalles ou un système de poutres, collaborent à la stabilité horizontale de l'ensemble ensemble (ou par partie, le tube externe reprenant les efforts dus au vent, et le tube intérieur, stabilisé horizontalement par lui-même). «La première application assimilable au concept est à nouveau redevable à Fazlur Khan pour le One Shell Plaza de Chicago en 1971» 26 (noyau composé de murs de refend, dalles et «tube encadré» périphérique, tous en béton, 218 mètres.

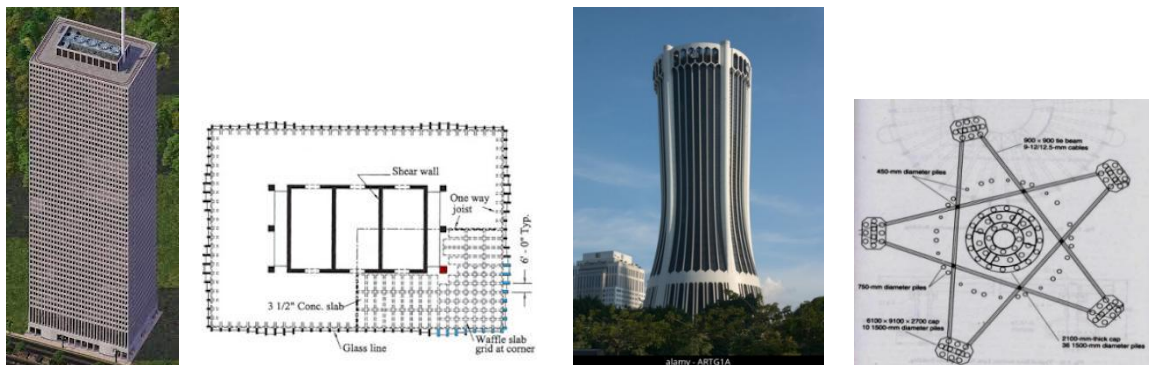


Fig. 6. 6 : Des exemples des IGH, One Shell Plaza de Chicago et Lumbago Tatung Hajji Building, Kuala Lumpur

4.6 Tube et tube :

Cette structure également souvent décrite sous le nom de «tubes groupés» est conçue par la «décomposition» de la tour en plusieurs tubes reprenant conjointement les efforts horizontaux en étant solidarisés. Cette configuration «implique naturellement une très forte résistance à la torsion adaptée aux formes asymétriques» ainsi que la diminution de la «densité de structures» par tubes vis-à-vis d'un

tube unique. Formellement il fut le premier concept permettant de sortir de l'expression «d'un volume unique», comme exemple le projet de la Willis Tower de Chicago.

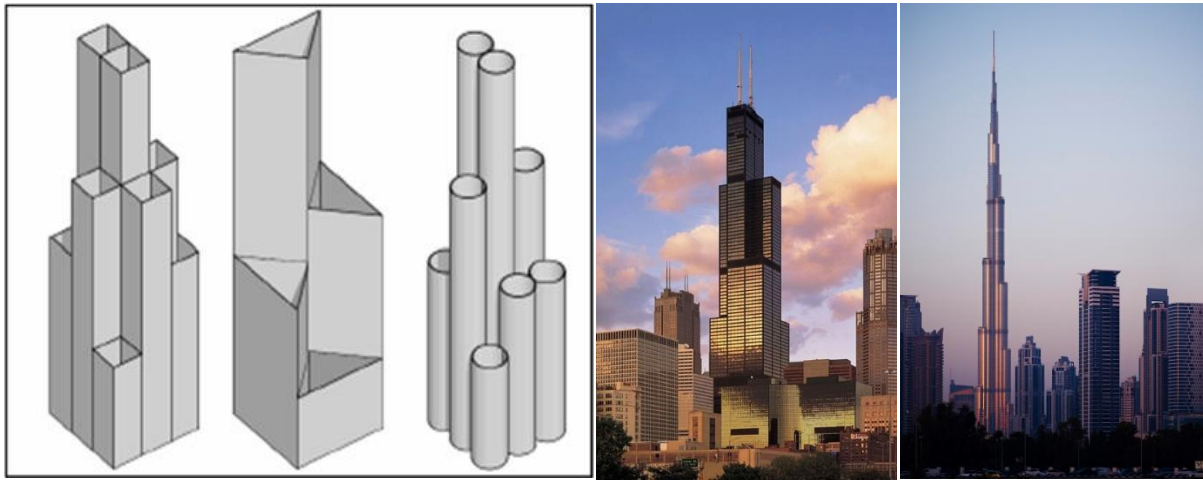


Fig. 6. 7 : Tube et tube «tubes groupés» à unité carrées, triangulaires et circulaires (tower Chicago et Burdj Khalifa Doubaï).

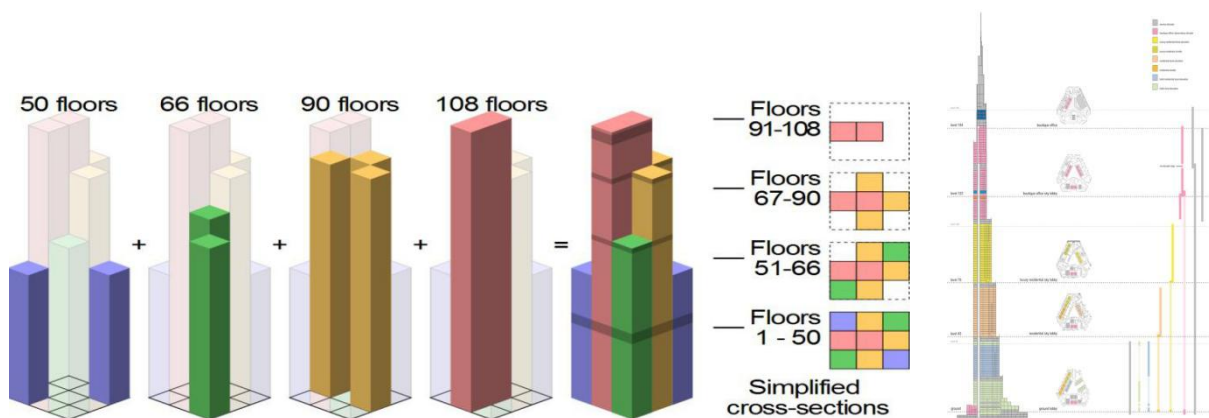


Fig. 6. 8 : Willis tower Chicago. Burdj Khalifa Doubaï.

4.7 Exosquelette:

L'exosquelette consiste en une structure externe pour la reprise des charges horizontales. La distinction principale qu'il est possible de faire entre la structure en «tube_simple» ou «tube dans le tube» et l'exosquelette est la position de la structure. Il s'agit d'un treillis ou «d'un tube» de stabilisation entourant le volume «habité» qui a une structure interne soit exclusivement de reprise de charges verticales, soit un noyau collaborant avec l'exosquelette.

D'un point de vue strictement structural, le fonctionnement de l'exosquelette ne diffère (visiblement) pas de la conception d'un tube simple ou «d'une méga-console verticale», il est même possible de considérer que la structure peut être conçue librement pour répondre aux efforts. D'un point de vue architectural, l'expression est fondamentalement «structural sante»

dans le cas d'un treillis métallique et fortement dépendante de ce concept introduisant la double lecture «volume en retrait et structure d'une autre nature».

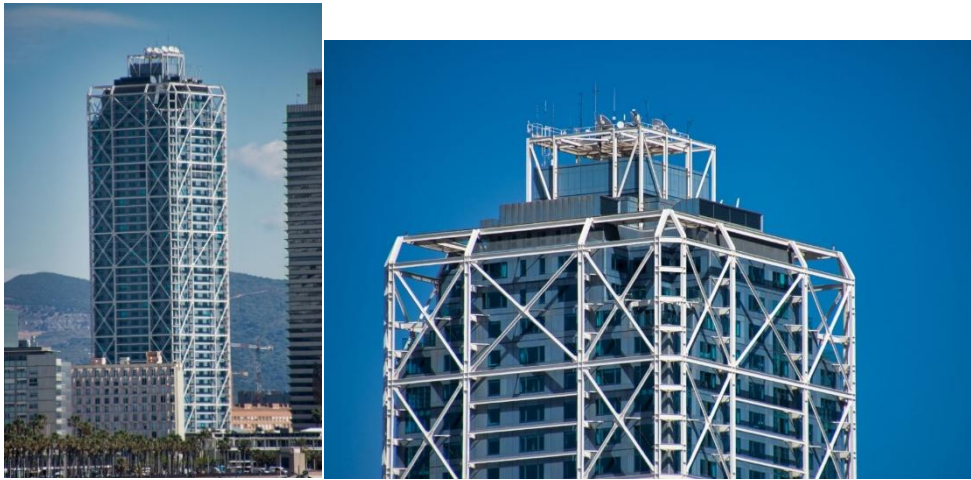


Fig. 6. 9 : Exemple de l'hôtel las artes Barcelona., Zoom sur la partie supérieure du projet

4.8 Tube monolithique:

Le tube monolithique, presque exclusivement en béton, est l'expression la plus fréquente des noyaux, mais s'avère également être utilisée comme structure périphérique. Il consiste en une conception classique de la transmission des efforts «entre des ouvertures» dans une masse homogène en béton armé. L'expression de ce système est sûrement la massivité et le rapport plein/vides basculant vers le plein, les ouvertures étant une porosité de la masse. Ce système permet d'obtenir à l'intérieur et à l'extérieur une certaine forme d'abstraction et d'effet aléatoire de la trame correspondant à une tendance architecturale actuelle «fuyant la régularité effrayante» des trames régulières surtout pour des bâtiments de très grande échelle.



Fig. 6. 10 : Agbar tour Barcelone et O14 Dubaï.

4.9 Tube renforcé :

ut introduit par Fazlur Khan dans les années 1960 à l'occasion de la réalisation du John Hancock Center de Chicago avec une structure en acier de grande échelle présentant des diagonales. Fazlur Khan réinterpréta cette structure, mais cette fois en béton pour l'Onterie Center de Chicago en 1986 (174 m). Le tube renforcé consiste à stabiliser la grille par la présence de diagonales, à l'instar d'une console en treillis, reliant les éléments verticaux. C'est en quelque sorte un concept de stabilité globale préféré à une rigidité locale.

L'expression de ce système est clairement caractérisée par l'apparition des «Mégadiagonales». Celles-ci ont leur importance également sur le caractère du projet vu de l'intérieur. Les diagonales passant au travers des niveaux donnent une identité forte aux espaces. Initialement considérée plutôt comme un «défaut», la présence de ces éléments emblématiques est «devenue un argument de vente dans le cas de la tour du John Hancock Center».

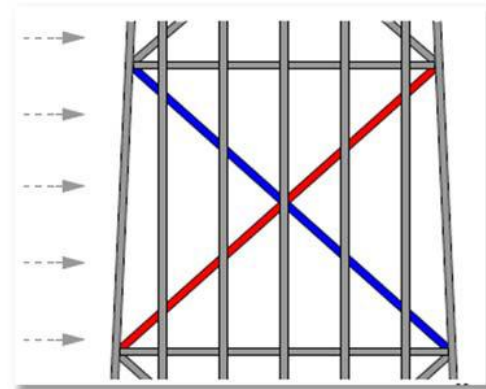


Fig. 6. 11 : John Hancock Center et Schéma inspiré par la trame du John Hancock Center

4.10 Grilles diagonales :

La grille diagonale est une structure exclusivement constituée d'éléments diagonaux impliquant l'absence d'éléments verticaux que l'on retrouve dans la plus part des systèmes y compris les Tubes contreventés. Cette caractéristique est due au fait que les éléments reprennent autant des charges verticales que les sollicitations horizontales. La grille diagonale est cependant généralement stabilisée par des éléments horizontaux, le module étant donc un

losange «tenu en son milieu», mais le fondement de ce système se base sur «une série de triangles qui combinent la résistance aux efforts verticaux et horizontaux en un système, rendant celui-ci résistant, efficient et plus léger.

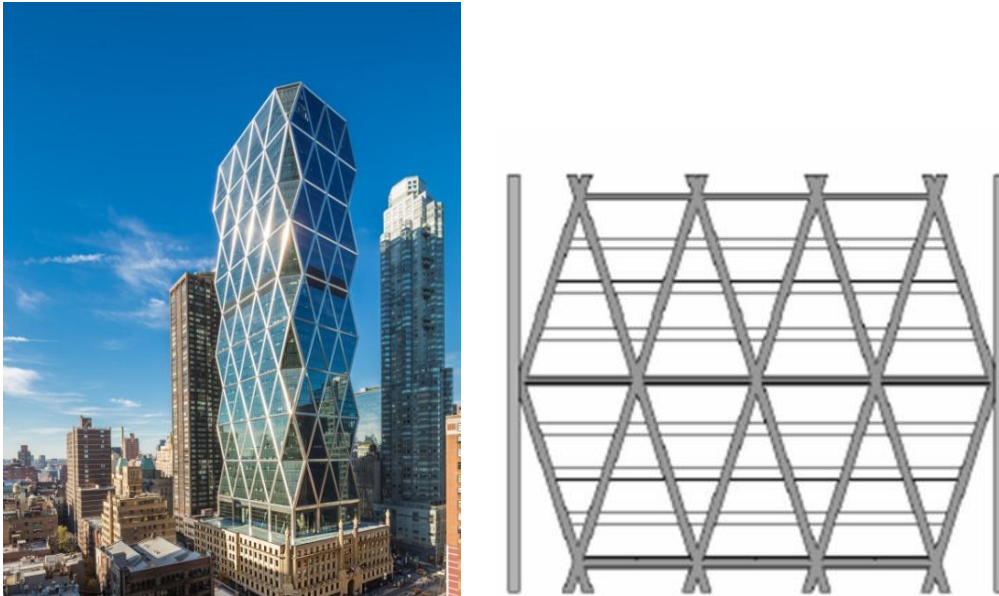


Fig. 6.12 : Hearst Tower / New York / 186 m avec des grilles diagonales

4.11 Résilles structurelles :

Les résilles structurelles sont une forme d'optimisation du concept de structure monolithique en ce sens que l'équilibre bascule du plein vers le vide. La structure est conçue selon une trame généralement diagonale transmettant ainsi autant les efforts horizontaux que verticaux. L'idée d'une résille structurelle est de concevoir une structure tubulaire homogène et pour autant la plus transparente.

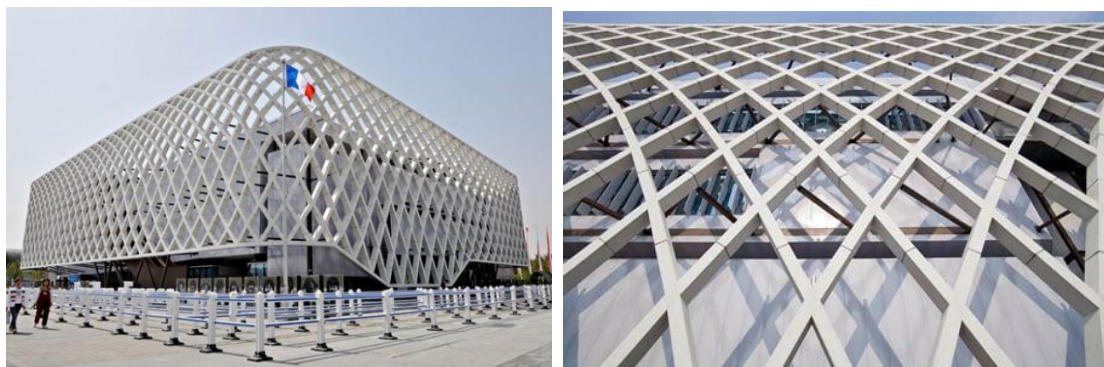


Fig. 6.13 : Le pavillon Français à l'exposition universelle 2010 à Shanghai Jacques Ferrier,
Zoom sur la façade du projet

4.12 Résille spécifique :

Résille spécifique, le treillis de Mitchell : Cette théorie génère une structure/résille optimale, et en adéquation avec la tendance actuelle, exprime une forme «d'irrégularité». Contrairement à beaucoup de théorie mathématiques sans réel lien avec la structure mais utilisées pour générer par informatique une trame, le Treillis de Mitchell puise son expression dans l'économie de matière et l'efficacité structurale.

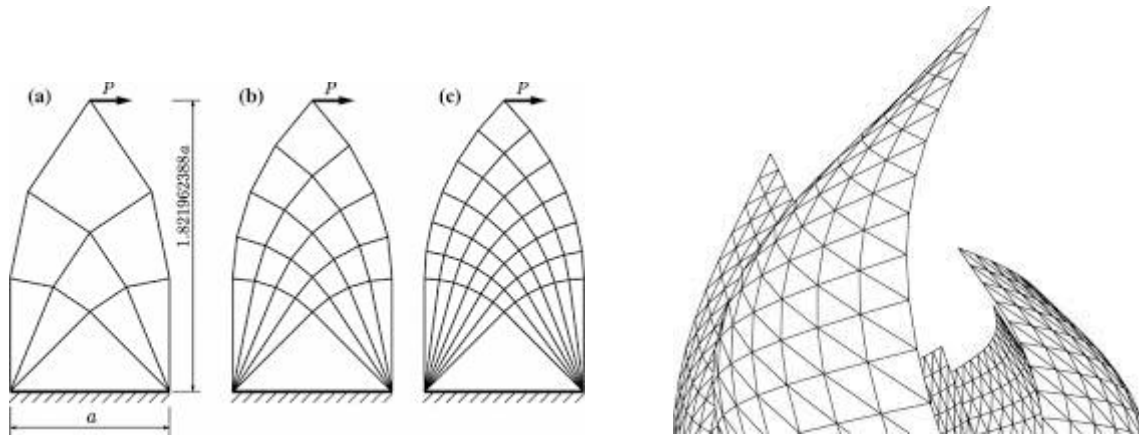


Fig. 6. 14 : Résilles spécifiques

5. Matériaux utilisés dans la construction :

5.1 Le béton :

La majorité des Immeubles Grande Hauteur présents sur le territoire français (530 IGH au total, dont 335 à Paris et sa couronne) ont une structure en béton. Un succès qui s'explique par les réponses apportées aux principales attentes : stabilité du bâtiment ; grandes portées pour un maximum de surface ; intégrité de la construction face aux "agressions" extérieures potentielles (vent, explosions, feu...) ; inertie thermique.

Les éléments en béton permettent une stabilité au feu importante qui garantit, en cas de sinistre, le maintien de la stabilité de l'immeuble sans mise en place de protection particulière. La tenue au feu du béton est donc telle que le matériau n'a pas à être protégé. Lors d'un incendie, en effet, la peau extérieure d'une structure en béton peut atteindre une température de l'ordre de 700°C. Mais du fait de sa faible conductivité thermique, la température dans la masse reste très inférieure et l'ossature en béton demeure intacte dans sa structure. Autre atout majeur : le béton n'aide pas à la propagation du feu en cas d'incendie (le matériau de

construction n'agit pas comme un vecteur supplémentaire du développement du feu et des fumées). Autant de qualités qui permettent au béton de garantir l'intégrité de la construction dans les conditions accidentelles les plus difficiles.

ou en structure béton se montrera donc plus confortable et moins exigeant en dispositifs de refroidissement de type climatisation. Les qualités sont les mêmes en hiver, où le béton tend à conserver durant la nuit la chaleur accumulée dans la journée. À la clé, des économies d'énergie appréciables et donc une incidence réduite sur le réchauffement climatique.

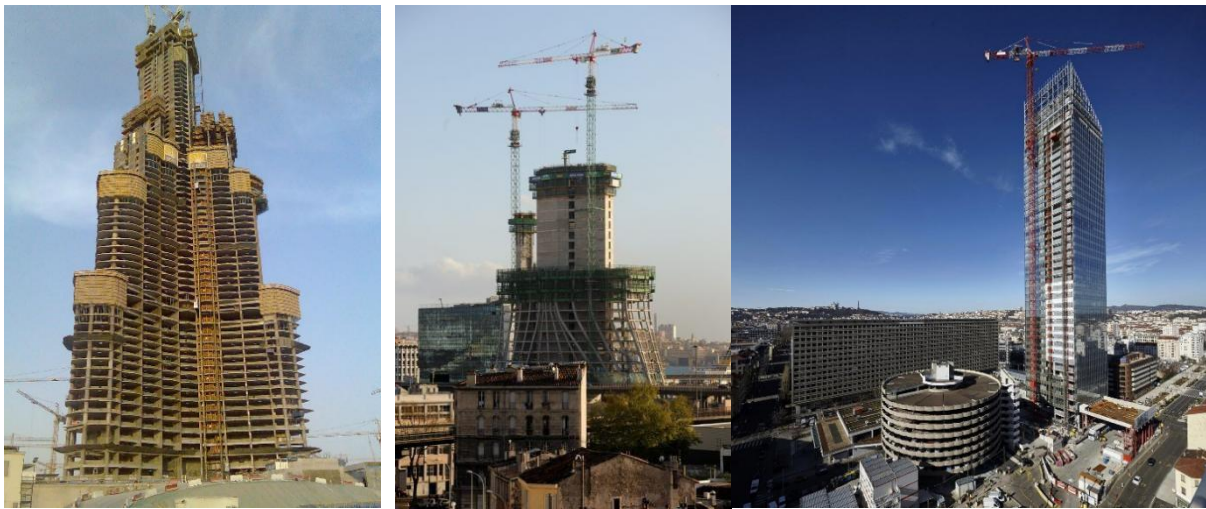


Fig. 6. 15: Des exemples des IGH (burdj Khalifa. Tour CMA-CGM Marseille.Tour Incity à Lyon).

5.2 L'acier :

L'avantage de l'utilisation d'acier dans la structure des IGH dépend des propriétés mécaniques fondamentales de l'acier comme la résistance aux efforts (module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique), dureté, résistance aux chocs (résilience).

Mais il y a aussi des quelques inconvénients comme la mauvaise résistance à la corrosion ou le fait qu'il est assez difficilement à mouler.

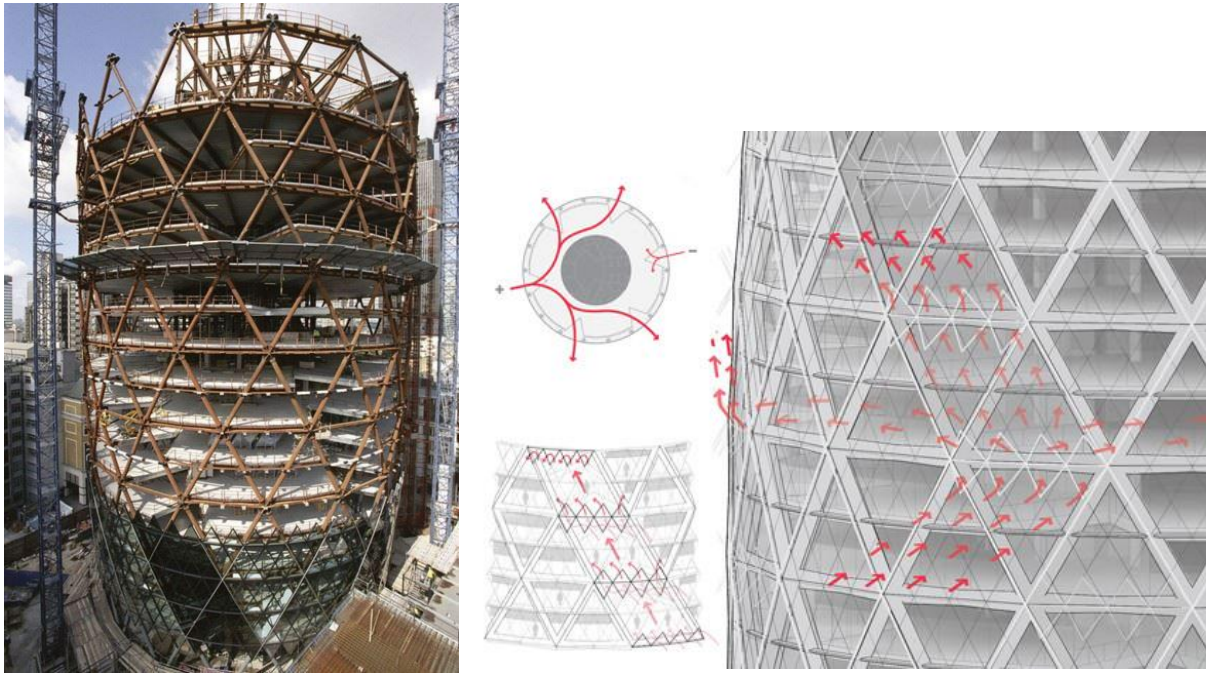


Fig. 6.16: Tour Foster à Londres.

Le verre : le verre offre une transparence et une esthétique moderne à la fois contemporaine et élégante.

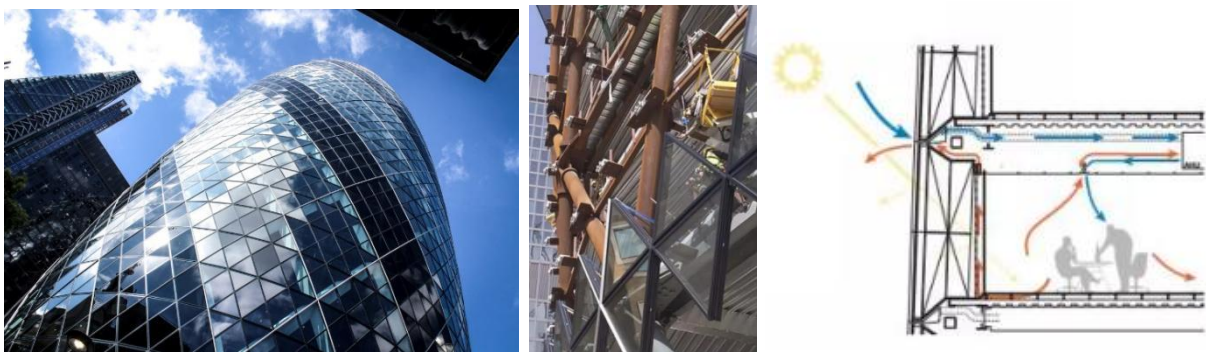


Fig. 6.17: Copole de la Tour Foster, Détail de vitrage de la tour Foster

6. Les principes fondamentaux de la sécurité :

Pour assurer la sauvegarde des occupants et du voisinage, la construction des immeubles de grande hauteur doit permettre de respecter les principes de sécurité ci-après.

- Pour permettre de vaincre le feu avant qu'il n'ait atteint une dangereuse extension :

L'immeuble est divisé en compartiments, dont les parois, ne doivent pas permettre le passage du feu de l'un à l'autre en moins de deux heures. - Les matériaux susceptibles de propager rapidement le feu sont interdits.

- L'évacuation des occupants est assurée au moyen de deux escaliers au moins par compartiment.
- L'immeuble doit comporter :
 - une ou plusieurs sources autonomes d'électricité destinées à remédier, le cas échéant, aux défaillances de celles utilisées en service normal.
 - un système d'alarme efficace ainsi que des moyens de lutte à la disposition des services publics de secours et de lutte contre l'incendie et, s'il y a lieu, à la disposition des occupants.
- En cas de sinistre dans une partie de l'immeuble, les ascenseurs et monte-charge doivent continuer à fonctionner pour le service des étages et compartiments non concernés par le feu.
- Des dispositions appropriées doivent empêcher le passage des fumées du compartiment sinistré aux autres parties de l'immeuble.
- Les communications d'un compartiment à un autre ou avec les escaliers, doivent être assurées par des dispositifs étanches aux fumées en position de fermeture et permettant l'élimination rapide des fumées introduites.
- L'aménagement et l'isolement des locaux techniques entre eux.

L'implantation :

La construction d'un IGH n'est permise qu'à des emplacements situés à 3 km au plus d'une unité de la protection civile. Les sorties des immeubles sur les niveaux accessibles aux engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie ne peuvent se trouver à plus de 30 mètres d'une voie ouverte à la circulation à ses deux extrémités et permettant la circulation et le stationnement de ces engins. Sur ces voies, un cheminement répondant aux caractéristiques minimales suivantes est réservé en permanence aux sapeurs-pompiers.

L'isolement :

L'isolement d'un IGH par rapport aux constructions voisines peut se réaliser : Soit par un mur ou une façade verticale. Soit par la mise en place d'un volume de protection.

a. Le mur d'isolement :

Il doit pouvoir résister à l'action d'un incendie pendant une durée minimum de 2 heures. Ce mur doit être construit toute hauteur, pour être considéré comme une paroi d'isolement réglementaire. D'un point de vue technique, on dit qu'il est coupe-feu de degré 2 heures.

b. Le volume de protection :

Le volume de protection est une appellation qui n'apparaît que dans la réglementation IGH. Il s'agit d'une aire libre d'isolement d'une largeur minimale, par rapport à tous points des façades de l'IGH, de 8 mètres.

1. Les parois de l'immeuble en contact avec d'autres constructions doivent être coupe feu de degré deux heures au minimum (CF 2H).
2. Ce degré est porté à quatre heures si les locaux voisins sont destinés au stationnement de véhicules automobiles (CF 4H).

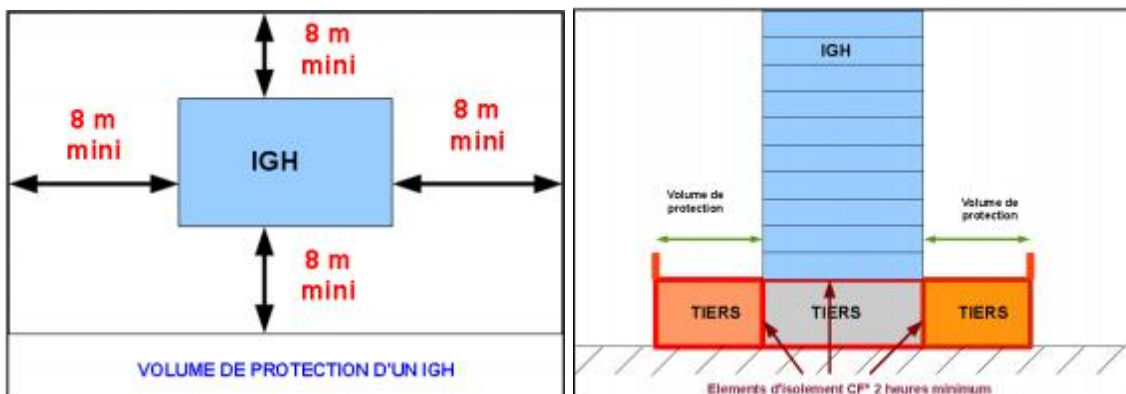


Fig. 6. 18: Volume de protection , Element d'isolement CF°2 heures minimum

Le compartimentage dans les IGH :

Le compartimentage est une notion d'isolement, permet d'éviter l'extension et la propagation et le passage des fumées et des flammes d'un compartiment à un autre et aux autres parties de

l'immeuble. L'un des principes fondamentaux de la sécurité contre l'incendie dans les IGH concerne le compartimentage des locaux. Ce compartimentage doit permettre de vaincre l'incendie avant qu'il n'ait atteint une dangereuse extension. A cet effet, le bâtiment est divisé en compartiments dont les parois péri métriques doivent pouvoir contenir l'incendie pendant une durée de 2 heures. D'autre part, les matériaux combustibles se trouvant dans chaque compartiment sont limités. De même, les matériaux susceptibles de propager rapidement l'incendie sont interdits.

La principale action de compartimentage c'est la préservation des personnes et la préservation des marchandises et des produits et la préservation de voisinage.

- Un compartiment est un volume qui a des parois REI 120 une Surface de 2500m² maximum et une longueur de 75m maximum.
- Un compartiment, peut regrouper 2 ou 3 niveaux maximum.

Ce choix de construction propre à l'IGH permet d'assurer une sécurité optimale des autres compartiments en cas de sinistres ; Ce qui permet de ne faire évacuer que le compartiment concerné.

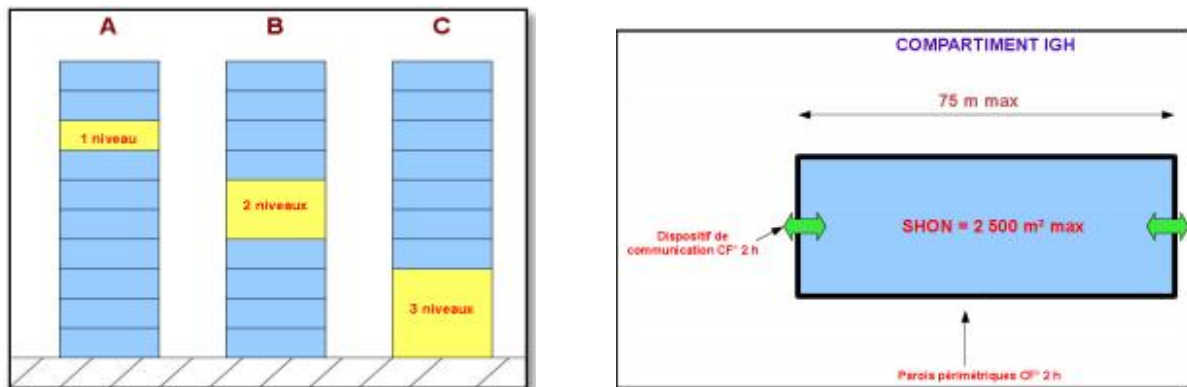


Fig. 6. 19: Le compartimentage dans les IGH

Désenfumage des couloirs :

Le désenfumage, en cas d'incendie, revêt une importance considérable dans les IGH. Il y a lieu de distinguer le désenfumage normal et le désenfumage de secours.

Désenfumage normal : Il concerne les circulations horizontales communes qui sont en cloisonnées de plancher

à plancher. Le système de désenfumage doit être mis en route automatiquement, dans le compartiment sinistré, par asservissement à la détection automatique d'incendie située en plafond des couloirs. Si la nécessité de désenfumer se fait sentir exceptionnellement dans d'autres compartiments, cela ne doit être possible que manuellement.

Désenfumage de secours : Pour pallier éventuellement une insuffisance du système de désenfumage normal, un désenfumage de secours, à vocation opérationnelle, doit permettre aux sapeurs-pompiers d'évacuer les fumées et les gaz chauds à l'extérieur de l'immeuble. Pour ce faire, quatre ouvrants de 1m² en façade et par niveau doivent être disposés judicieusement dans les couloirs, le plus près possible des sas d'accès aux escaliers. Les escaliers disposent également, en partie haute, d'un désenfumage de secours.

Résistance au vent :

La force exercée par le vent sur les IGH est le principal enjeu des architectes. En effet où que se situe la construction, il y a toujours du vent qui vient l'ébranler. Pour contrer cette inévitable action diverses techniques pour tenter d'amoindrir les effets du vent ont vu le jour.

Afin de protéger les employés ou les habitants du IGH, les fenêtres ne peuvent plus s'ouvrir à partir d'un certain niveau du fait de la violence du vent sur la façade et aussi du fait d'une chute qui serait mortel pour la personne défenestrée ou d'un objet potentiellement tombée et qui tuerait un individu au sol. Les locataires de ce lieu ne peuvent donc jamais aérer les locaux et ne sont fournis en air que par un circuit de ventilation central dont la panne entraîne nécessairement une évacuation si elle est prolongée.

Pour réduire l'effet de la force du vent, les ingénieurs font en sorte de mettre une arrête du bâtiment face au vent. Le problème persiste quand le vent change de direction. Dans ce cas les matériaux utilisés sont adaptés au site : les fondations sont plus profondes, les matériaux utilisés sont le plus flexible possible.

Une des échelles les plus souvent utilisées est celle de Beaufort, qui permet d'estimer la vitesse du vent selon ses effets sur l'environnement.

Techniques pour lutter contre la violence du vent :

a- Dans le cas d'un gratte-ciel à construction noyau béton :

Dans ce cas, les tirants sont placés à l'intérieur même du noyau, en présence aussi des ascenseurs et autres canalisations.

b- Dans le cas d'un gratte-ciel a structure en tubes : Tous les gratte-ciel de ce type de construction ont des éléments de leur structure similaires.

Des poteaux creux sont scellés dans le sol et reliés deux à deux en portiques. A ces poteaux sont disposés des gerberettes. La gerberette est un balancier qui est enfilé sur le poteau et bloqué par un axe traversant le poteau au niveau de chaque étage. Du côté intérieur elle va permettre la fixation des poutres, du côté extérieur la fixation des tirants. Par la suite sont mis en place les poutres fixées entre deux poteaux sur les gerberettes.

A l'extérieure de chaque gerberette est fixé un gros câble passant de la plus haute à la plus basse et courant le long du gratte-ciel puis est scellé dans le sol. -C'est le tirant qui comme son nom l'indique est en tension, tiré en direction verticale, vers le sol, dont l'effet est de tenir la construction en équilibre.

7. Les IGH les plus connues du monde :

1 /Burj khalifa (dubai,emirets arabes unies) : actuellemlent la plus haute tour du monde ,meusure 828m de hauteur.



2 /Shangai tower(shangai,chine) :la deuxieme tour la plus haute du monde avec 623m de hauteur.



3 /one world trade center(new york,USA) : avec une hauteur de 546m.



4/abraj al bait (la mecque,arabie soudia) :est un complexe formé de plusieurs gratte ciels,la makkah clock royal tower avec 601m de hauteur et 120 étages.



8. Etude de cas emblématique d'un IGH : Tour de foster (Normane foster)

8.1 Presentation de la tour :

Foster tower est un bâtiment phare non seulement pour la ville de Londres mais aussi pour le travail de Norman Foster. Ce projet implique plus de huit ans de travail et les intentions qui ont guidé la conception représentent les valeurs fondamentales de la firm.

le projet présente alors une tour de 180 mètres de hauteur et 41 850 m² d'aire de plancher net, sans compter les étages en sous-sol. Son organisation spatiale intérieure est très simple. Elle comprend en fait, une typologie de base Qui se répète sur l'ensemble des étages, sauf peut-être sur quelques-uns bien particuliers. La typologie de base présente en plein centre du plan radial de la tour, le noyau de services communs et en périphérie, un plan ouvert ponctué au pourtour par des atriums triangulaires découpant les étages en sous-parties ayant comme vocation, l'aménagement d'espaces à bureaux. En somme, la tour ne possède que deux plans atypiques, soit le rez-de-chaussée comportant un espace commercial et les trois derniers

La hauteur jusqu'au sommet du dôme : 179,8m

La hauteur jusqu'au niveau d'étage occupé le plus élevé : 167,1 m.

Le nombre d'étages : 41.

Nombre d'ascenseur : 23

Surface totale : 47950 m².

Style : néo futurisme.

Matériaux : béton, façade en verre, structure en acier.



8.2 Attributs constructifs et détails du projet :

Fondation :

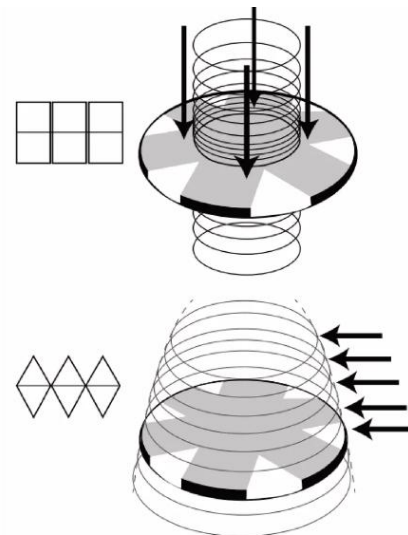
Le bâtiment est posé sur 333 piliers cylindriques creusés à 25 mètres dans le sol. À la base les piliers ont une dimension de 750 mm de diamètre et sont assis sur un sol argileux. Cependant, dans la section supérieure, les piliers furent forés plus large pour permettre l'ajout temporaire de boîtiers en acier. Sans ces boîtiers, l'eau présente dans le sol aurait causée l'effondrement des puits de forage étant donné qu'à ce niveau la composition du sol permet à l'eau de s'écouler librement, ce qui aurait fragilisé le sol. Les boîtiers sont retirés dès que le coulage du béton est effectué. Puisque pour une raison de gestion du site les piliers n'étaient pas coulés et creusés en même temps, les boîtiers en acier furent réutilisés d'un pilier à l'autre, permettant une économie de coûts et de matériaux. Si les bases des puits de forages n'ont pas eu besoin de ces boîtiers, c'est qu'elles étaient creusées dans de l'argile, matière qui ne permet pas l'écoulement des eaux. Trois foreuses furent nécessaires pour forer les puits.



Structure centrale :

La structure centrale est construite avec des éléments d'acier et supporte toutes les charges verticales. Suivant la forme générale de la tour, elle prend aussi une forme circulaire.

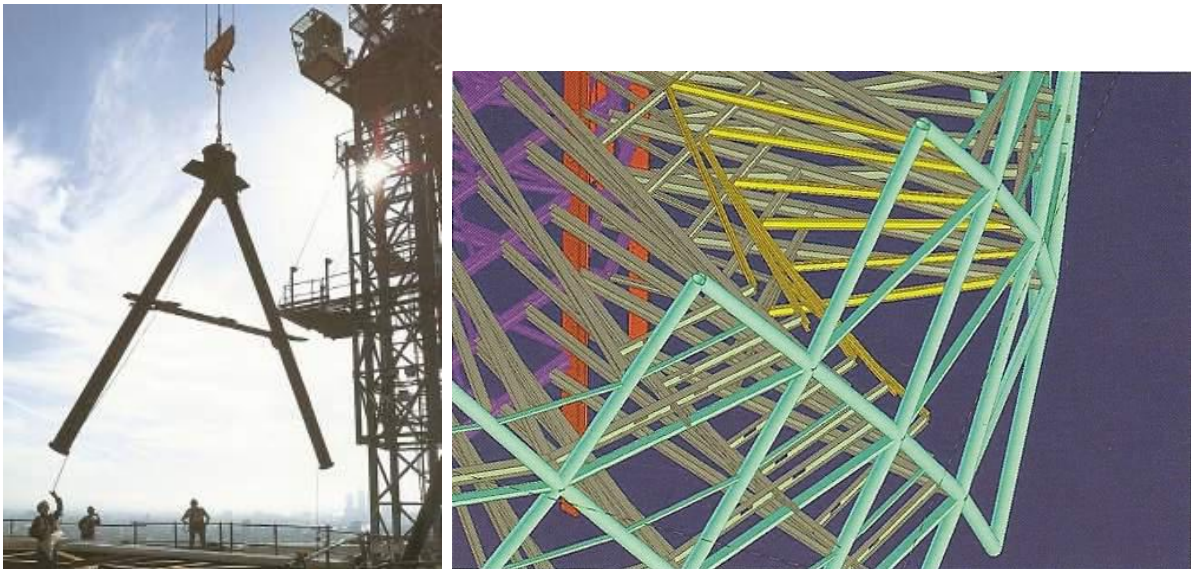
La structure centrale et la structure externe (Diagrid) décrite plus bas sont connectées à chaque étage par des poutres radiales en acier un peu à l'image d'une roue de vélo et ses rayons. L'usage d'un noyau central et d'une structure extérieure permet d'avoir entre ces deux éléments des plans libres. Ainsi les services sont situés au coeur du bâtiment et les bureaux bénéficient d'espaces complètement ouverts. Au moment de la construction, le noyau central était construit de 4 à 6 étages en avance sur la structure extérieure (Fig.27) afin d'assurer la stabilité de l'ensemble.



Le diagride :

La Diagrid est la réponse structurelle trouvée à la forme courbée de la tour. Posée en périphérie, c'est aussi une partie essentielle de la structure puisqu'elle reprend les efforts

horizontaux principalement causés par le vent ce qui en fait une surface «statiquement active.» En plus d'être hautement efficace, elle est résistante, économique et d'une grande stabilité. En effet, en comparaison avec une tour normale, elle utilise près de 20% moins de tonnes d'acier. C'est principalement dans le noyau central de la structure que l'on gagne le plus puisque celle-ci n'a pas besoin de contreventements supplémentaires pour supporter les efforts horizontaux puisque la diagrid s'en charge. Au total, la structure d'acier pèse 8537 tonnes pour 8542 éléments. Formellement, la Diagrid est un treillis diagonal tubulaire en acier qui suggère l'entrelacement de spirales. Pour composer sa trame diagonale, l'utilisation de cadres préfabriqués en acier ayant la forme d'un «A» a été choisie. Deux de ces cadres sont mis bout à bout pour créer un losange qui couvre 4 étages du bâtiment. N'étant pas un modèle unique.



chaque cadre n'est pas nécessairement identique. Cette souplesse dans la dimension des cadres permet de s'ajuster aux changements de diamètre de la tour, sachant qu'elle atteint à son maximum 57 mètres de diamètre au 17ème étage avant de diminuer graduellement jusqu'à son sommet.

Malgré la forme en apparence courbe de la surface, tous ses éléments tubulaires sont droits. Au niveau des forces les deux éléments principaux du cadre travaillent en compression et le dernier, celui qui fait office de trait pour le «A» travaille en tension.

Dans le cas de la Swiss Re, la modélisation a été un outil important de conception et a permis de résoudre les difficultés de la forme qu'une structure standard n'aurait pu résoudre. Elle a entre autres permis de concevoir les éléments de jonction des cadres.

Ces éléments de jonction sont des noeuds couvrant 360 degrés et uniques à chaque intersection. Développés par un métallurgiste, Victor BuyckHollandia, chaque nœud a une hauteur de 2m et est fait de 3 panneaux d'acier soudés sous différents angles. Ces angles sont définis par les cadres en «A» qui y sont attachés. Ainsi chaque noeud est conçu en fonction de son emplacement sur la structure d'où l'importance de l'outil numérique. La précision de ce travail de structure est énorme et une étroite collaboration entre les architectes et les ingénieurs a été nécessaire. Pour donner un ordre d'idée: «Le succès du système [de noeud] dépend de la précision de la fabrication: les surfaces d'appuis fabriquées en usine sont conçues avec une tolérance de 0,1 millimètre.

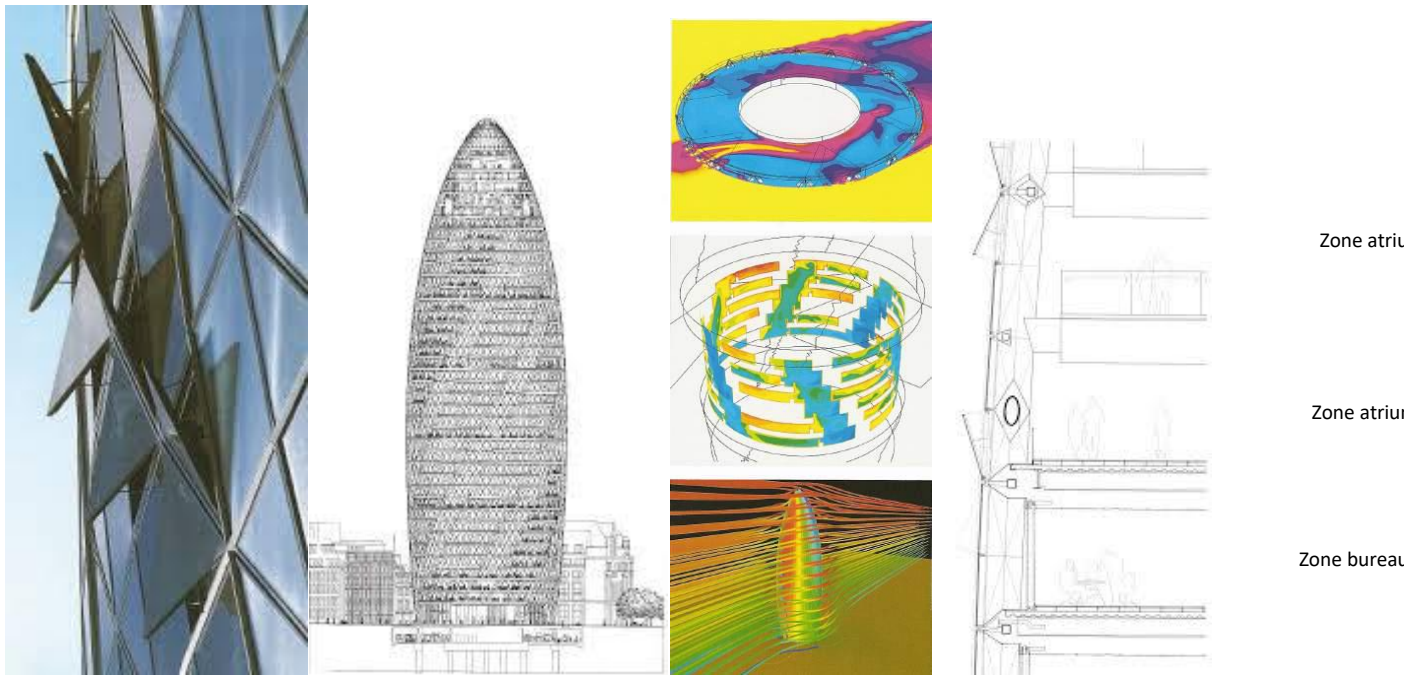


Sécurité :

L'ensemble de la structure est toutefois masqué par une enveloppe servant à la protection de la structure en cas d'incendie. C'est donc ce revêtement que l'on peut observer à la fois de l'extérieur et de l'intérieur du bâtiment. La structure reste ainsi visuellement lisible. Le choix de couleurs de ce revêtement est d'ailleurs déterminant dans cette lisibilité. Les éléments voulus très voyants sont peints en blanc et ceux peints en bleu foncé s'effacent à travers le vitrage. Une maquette de taille réelle a d'ailleurs été installée dans le bureau de Foster pour tester la lisibilité des couleurs peu importe le type de ciel. Au final, seuls les losanges créés par deux cadres en «A» restent lisibles. Une autre conséquence constructive de la protection incendie est la séparation des atriums en zones de 6 étages. Ainsi à chaque 6 étages, un plan de plancher plein crée une barrière en cas d'incendie et limite la propagation de la fumée.



Pour bien comprendre les spécificités de l'enveloppe de la Swiss Re, il importe de bien saisir les impacts de la forme particulière de ce bâtiment. Inspirée de l'aviation, et plus particulièrement de l'aérodynamisme, l'idée était, en plus d'obtenir une efficacité structurale, d'utiliser les principes de pression de l'air pour avoir une dépense d'énergie minimale. Grâce à sa forme aérodynamique, la pression du vent sur les façades est moindre que pour un bâtiment rectangulaire standard et « crée moins de turbulence, de retour de vents et d'inégalités des pressions de vents. C'est cette particularité qui permet à la tour d'avoir de la ventilation naturelle. Une plus grande régularité de la pression de l'air sur la façade permet ainsi d'avoir des fenêtres ouvrantes mécaniquement et étant donné la forme courbe de l'enveloppe la pression est continue d'une ouverture à l'autre. Ces ouvertures s'ouvrant sur les atriums suivent la diagonale de la trame structurale et l'échange d'air y est accentué par le désalignement des ouvertures. Les atriums servent aussi d'espaces tampons et préservent les zones de travail de courants d'air inconfortables comme le démontre montrant la vitesse du vent à travers un étage type de bureau lorsque les fenêtres sont ouvertes. La vitesse diminue rapidement une fois passée la zone tampon de l'atrium c'est pourquoi les bureaux se trouvent principalement là où se trouvent les espaces bleus, zones peu touchées par les courants d'air. Grâce à des simulations par ordinateur du consultant environnemental Hilson Moran, l'équipe de Foster a pu constater les mouvements prévus de l'air et ainsi confirmer la possibilité de ventiler le bâtiment naturellement. Un système de climatisation standard est toutefois disponible pour les cas extrêmes de chaleur, de froid, de pluie ou de vent. Pendant près de 40% de l'année, le bâtiment peut fonctionner avec les fenêtres ouvertes permettant d'importantes économies d'énergie.



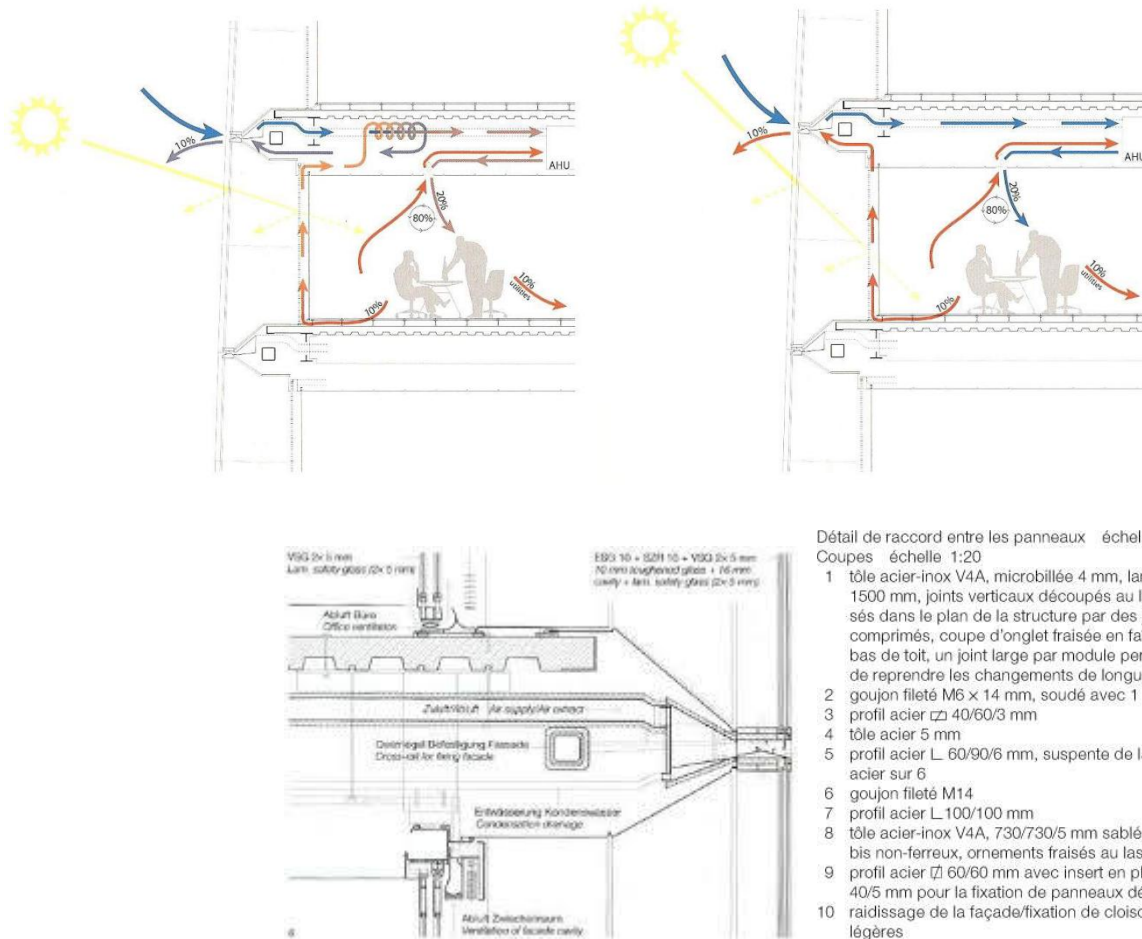
L'enveloppe — Double vitrage :

Une autre qualité de la Swiss Re en matière d'efficacité énergétique se trouve dans la composition de son enveloppe. Celle-ci contribue à l'isolation de la tour et au contrôle des gains solaires avec sa double enveloppe. La première, le revêtement extérieur, est constituée d'un double vitrage en verre simple (10 millimètres) de sécurité teinté de gris avec un traitement de protection solaire. Entre la couche extérieure et intérieure se trouve une cavité de 1 à 1,4 mètres de profond dans laquelle se trouvent des stores vénitiens servant à couper l'éblouissement causé par le soleil. Ceux-ci contribuent aussi à réduire les gains solaires dans les zones de bureaux. La cavité se trouve ainsi à être une zone de transition thermique. La seconde enveloppe, la couche intérieure, est pour sa part un verre feuilleté de sécurité de 5 + 5 millimètres. En somme, ce système permet d'obtenir une réduction de 85% des gains solaires.

Cette double enveloppe participe aussi à la ventilation des espaces de travail puisqu'il est prévu que l'air puisse circuler dans les cavités (entre-plafond) du bâtiment. Ainsi, le système de circulation d'air procure confort aux occupants été comme hiver.

L'hiver, l'air chaud de retour passe par un échangeur de chaleur pour réchauffer l'air entrant avant d'être évacué. De cette façon, les risques de courants d'air froid descendants et inconfortables sur les périmètres sont réduits.

L'été, c'est l'inverse, l'air frais qui entre dans le bâtiment contribue à rafraîchir l'air ambiant et la température des cavités, réduisant du même coup les gains solaires. Ensuite, il est ventilé au niveau du plafond puis évacué.



Revêtement

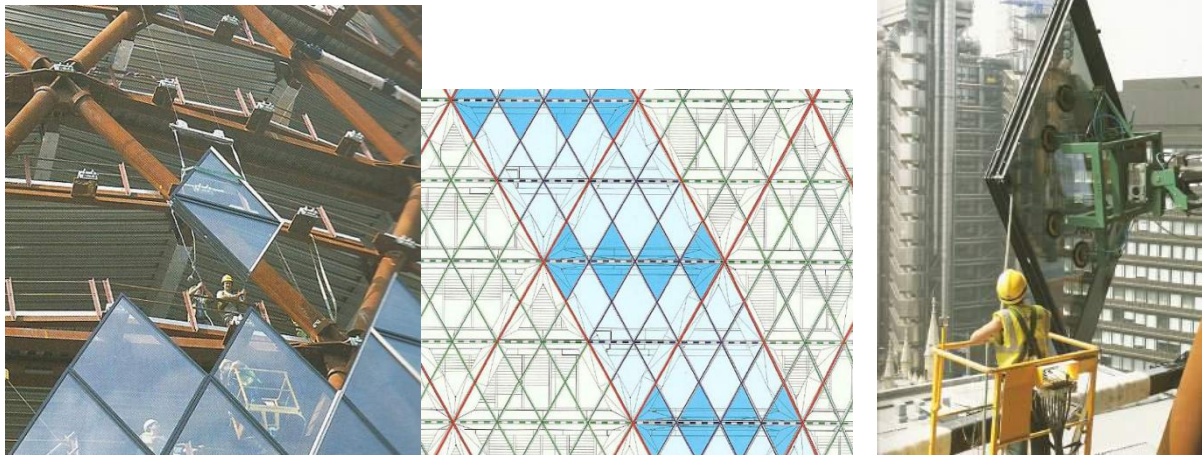
Comme le démontrent les coupes, le revêtement extérieur correspond au premier vitrage de la double enveloppe. C'est donc à travers celui-ci que l'on peut observer la Diagrid de la tour. C'est la trame structurale de cette dernière qui a déterminé celle du revêtement et par conséquent la forme en losange de la fenestration. Seul le revêtement des atriums se distingue par un vitrage teinté créant six spirales en façade. Tout comme la structure, ces éléments ne sont pas tous identiques et s'adaptent à la forme de la tour. Ils sont préfabriqués en usine et leurs cadres «sont constitués de profils en aluminium thermiquement dissociés et laqués au four.» La largeur des losanges correspond à 5 degrés du périmètre de chaque étage et varie donc entre 1,5 et 2,5 mètres. En somme, tout comme la structure, le système est plus complexe qu'il ne le semble en apparence. Le dimensionnement et le positionnement de des éléments sont aussi précis et exigeants que leur mise en oeuvre.

Chaque panneau pesant environ 750 kilogrammes devait être manœuvré de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur et devait être installé à une position précise «tout en permettant le mouvement inhérent de la structure d'acier.»

Une machine a d'ailleurs été conçue spécialement pour la pose des panneaux. Usant de ses coussinets desuccion,

Elle était responsable du déplacement et de la mise en place des panneaux. Le contrat de pose du revêtement fut, au terme de la construction, l'élément le plus couteux.

C'est principalement le travail multidisciplinaire de l'équipe et la contribution de collaborateurs d'expériences qui ont permis la construction et la mise en forme des idées de la Swiss Re. Sans ces partenariats la tour n'aurait pu atteindre ses hauts standards d'efficacité tant au niveau énergétique que structural. Les idées conceptuelles sont aussi une partie essentielle de cette réussite puisque, sans celles-ci, certaines idées innovantes n'auraient jamais été déployées.



Exemple 2 : tour de jaddah (tour de royaume)

Synthese des pions essentiels abordé dans la vidéo :

- La tour Djeddah en Arabie saoudite, conçue par Adrian Smith et Gordon Gill Architecture, vise à devenir le plus haut bâtiment du monde, dépassant la barre des 1 km.

- Le projet, estimé à 12 milliards de dollars, était initialement prévu pour être achevé en 2018, mais a subi des retards en raison d'un conflit entre les promoteurs et le gouvernement saoudien.
- La hauteur et le poids (900 000 tonnes) de la tour posent des défis techniques considérables, nécessitant des considérations spéciales pour la conception de la stabilité et des fondations.
- L'équipe a proposé une tour en forme de tripode, asymétrique, pour optimiser la stabilité et réduire l'utilisation des matériaux.
- Pour ancrer la tour, 270 pieux en béton (150-180 m de diamètre) ont été enfoncés à 50-110 m dans le sol, en utilisant une technique de forgeage complexe.
- Le choix des matériaux (béton et techniques traditionnelles) a été motivé par des considérations de coûts, malgré les défis de transporter le béton à de grandes hauteurs.
- La partie supérieure de la tour sera construite en acier, formant une flèche ornementale de 350 m et abritant des installations techniques.
- Le design de la tour comprend des mesures d'économie d'énergie, telles que des ombres stratégiquement placées et du verre isolant, pour minimiser le besoin de climatisation.
- La tour Djeddah comportera 530 appartements, 200 chambres d'hôtel et le plus haut observatoire du monde.
- Une flotte de 57 ascenseurs, capables d'atteindre des vitesses de 10 m/s, desservira les 167 étages de la tour.
- Des câbles en carbone avancés seront utilisés pour les ascenseurs, offrant une plus grande résistance, une durabilité et un poids réduit par rapport aux câbles en acier.
- La hauteur record de la tour suscite des questions sur la faisabilité de la construction de bâtiments encore plus hauts, certains experts suggérant une limite d'environ 1500 m.
- Les futurs mégaprojets peuvent se concentrer sur le Moyen-Orient ou l'Asie du Sud-Est, tandis que la construction souterraine pourrait également gagner en popularité en raison des contraintes d'espace et des préoccupations concernant la qualité de l'air.

Conclusion :

Les immeubles de grande hauteur (IGH) constituent aujourd'hui une composante majeure du paysage urbain moderne et représentent une réponse efficace aux enjeux de densification des villes, de valorisation du foncier et de développement économique. Leur réalisation est le fruit d'importantes avancées technologiques dans les domaines des matériaux, des méthodes de calcul et des systèmes constructifs, permettant de construire des ouvrages toujours plus hauts, plus sûrs et plus performants.

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les principales caractéristiques des IGH, leur classification, leurs avantages et leurs contraintes, ainsi que les différents systèmes structuraux utilisés pour assurer leur stabilité. Les structures tubulaires, les noyaux centraux, les exosquelettes et les systèmes en diagrid illustrent l'évolution constante des solutions techniques destinées à résister efficacement aux charges verticales et aux actions horizontales dues au vent ou aux séismes.

L'étude des matériaux de construction a également mis en évidence le rôle essentiel du béton, de l'acier et du verre dans la conception des tours modernes. Leur combinaison permet d'obtenir des structures à la fois résistantes, légères, durables et adaptées aux exigences architecturales contemporaines. De plus, les dispositifs de sécurité, notamment la protection contre l'incendie, le compartimentage, le désenfumage et les systèmes d'évacuation, constituent des éléments indispensables pour garantir la protection des occupants et la pérennité des ouvrages.

Les exemples d'IGH emblématiques à travers le monde, tels que le Burj Khalifa, la Shanghai Tower ou encore la Tour Foster, démontrent la capacité de l'ingénierie moderne à relever des défis techniques de plus en plus complexes tout en intégrant des critères de confort, de durabilité et d'efficacité énergétique.

Ainsi, la conception des immeubles de grande hauteur nécessite une approche multidisciplinaire associant architecture, ingénierie structurelle, sécurité, économie et développement durable. Face à l'urbanisation croissante et à la recherche de solutions constructives innovantes, les IGH continueront à jouer un rôle essentiel dans l'aménagement des villes du futur. Leur développement s'oriente désormais vers des bâtiments toujours plus intelligents, économes en énergie et respectueux de l'environnement, capables de répondre

aux exigences croissantes de performance, de sécurité et de durabilité. Les progrès réalisés dans les matériaux de construction, les technologies numériques et les systèmes de gestion des bâtiments ouvrent également de nouvelles perspectives pour la réalisation de tours toujours plus ambitieuses et plus adaptées aux défis du XXI^e siècle.

CONCLUSION GENERALE

Ce polycopié de **Structure 2**, destiné aux étudiants en **Architecture**, a pour objectif de fournir les connaissances fondamentales nécessaires à la compréhension du comportement des structures et à leur intégration dans le processus de conception architecturale. L'architecte ne se limite pas à la création des formes et des espaces ; il doit également comprendre les principes structuraux qui garantissent la stabilité, la sécurité et la durabilité des ouvrages.

À travers les différents chapitres abordés, l'étudiant a découvert l'importance de la **géotechnique** et des **fondations spéciales**, qui constituent le lien essentiel entre l'ouvrage et son terrain d'assise. La connaissance du sol et des solutions de fondation permet d'adapter le projet aux contraintes du site tout en assurant la sécurité de la construction.

L'étude de la **stabilité des structures face aux séismes** a mis en évidence le rôle majeur de la conception parasismique dans la protection des personnes et des biens. Les principes de régularité, de contreventement et de respect des règlements techniques constituent aujourd'hui des éléments incontournables dans la conception architecturale, particulièrement dans les régions exposées aux risques sismiques.

Les **systèmes porteurs des bâtiments métalliques** ont montré la diversité des solutions offertes par l'acier pour répondre aux exigences architecturales contemporaines. Grâce à leurs grandes portées, leur légèreté et leur flexibilité, ces structures permettent la création d'espaces fonctionnels et innovants tout en optimisant les performances techniques des ouvrages.

L'étude des **immeubles de grande hauteur (IGH)** a permis de comprendre les défis liés à la conception des bâtiments verticaux modernes, notamment la résistance aux actions du vent et des séismes, l'organisation des systèmes porteurs et les exigences réglementaires spécifiques à ce type d'ouvrage.

Enfin, les **structures mixtes acier-béton** ont illustré l'intérêt d'associer plusieurs matériaux afin de tirer profit de leurs qualités respectives. Cette complémentarité permet de réaliser des ouvrages plus performants, plus économiques et mieux adaptés aux besoins actuels de la construction.

Au-delà des aspects techniques, ce cours met en évidence l'étroite relation entre **architecture** et **structure**. Une bonne conception architecturale ne peut être dissociée d'une compréhension des principes structuraux qui la rendent réalisable. La structure ne doit pas être considérée comme une contrainte, mais comme un véritable outil de création capable d'enrichir l'expression architecturale et de participer à la qualité des espaces conçus.

Ainsi, les connaissances acquises dans ce module constituent une base indispensable pour la formation de l'architecte. Elles lui permettront de dialoguer efficacement avec les ingénieurs, de mieux appréhender les contraintes constructives et de développer des projets à la fois esthétiques, fonctionnels, sûrs et durables, répondant aux exigences techniques et environnementales de l'architecture contemporaine.

Bibliographie

- [1]. Francis D. K. Ching. Guide technique et pratique de la construction,
- [2]. Capra A., Davidovici V. Calcul dynamique des structures, Eyrolles, Paris 1984
- [3]. Zacek M., Construction parasismique, Parenthèses 1996
- [4]. RPA Alger 2010 et 2024
- [5]. Edwardo Torroja. Structures Architecturales
- [6]. Matthys Levy et Mario Salvadori. Comment ca tombe?
- [7]. Andrew W Charleson. Structure as architecture,
- [8]. A Muttoni. L'art des structures,
- [9]. Philip Garriso. Architectural Structures for Engineers and Architects
- [10]. R. Vittone : Bâtir, manuel de la construction. Ed. P.P.U.R.
- [11]. M. Salvadori : Comment ça tient. Ed. Parenthèses
- [12]. P. Rice : Les mémoires d'un ingénieur. Ed. Parenthèses
- [13]. Collectif : Construire en acier. Ed. P.P.U.R., 1999
- [14]. M.A Studer, F. Frey : Introduction à l'analyse des structures. Ed. P.P.U.R.
- [15]. E. Torroja : Les structures architecturales. Ed. Eyrolles
- [16]. M. Salvadori et R. Heller : Structures et architectures. Ed. Eyrolles
- [17]. N. Lislorg : Principe of structural design
- [18]. H. Thonier : Conception et calcul des structures de bâtiment
- [19]. P. Guillemont : Aide-mémoire de béton armé. Ed. Dunod 2005
- [20]. D. Gauzin-Müller : Construire avec le bois. Ed. Le Moniteur
- [21]. [21]. Bowles J. E., *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, 5th Edition.
- [22]. [22]. Das B. M., *Principles of Foundation Engineering*, Cengage Learning, 9th Edition, 2019.
- [23]. [23]. Coduto D. P., Yeung M. R. et Kitch W. A., *Foundation Design: Principles and Practices*, Pearson, 3rd Edition, 2016.
- [24]. [24]. Tomlinson M. J. and Woodward J., *Pile Design and Construction Practice*, CRC Press, 6th Edition, 2014.
- [25]. [25]. Terzaghi K., Peck R. B. and Mesri G., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, 3rd Edition, 1996.

-
- [26]. [26]. Braja M. Das et Nagaratnam Sivakugan, *Principles of Geotechnical Engineering*, Cengage Learning, 10th Edition, 2022.
- [27]. [27]. Frank R., Magnan J.-P. et al., *Fondations et ouvrages en terre selon l'Eurocode 7*, Presses de l'ENPC.
- [28]. [28]. Chopra A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Pearson, 5th Edition, 2017.
- [29]. [29]. Clough R. W. and Penzien J., *Dynamics of Structures*, Computers & Structures Inc., 3rd Edition.
- [30]. [30]. Paulay T. and Priestley M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, Wiley.
- [31]. [31]. Fardis M. N., *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings*, Springer, 2018.
- [32]. [32]. Booth E. et Key D., *Earthquake Design Practice for Buildings*, Thomas Telford Publishing.
- [33]. [33]. Dowrick D., *Earthquake Resistant Design and Risk Reduction*, Wiley, 2009.
- [34]. Eurocode 8 : *Calcul des structures pour leur résistance aux séismes*, EN 1998.
- [35]. [35]. FEMA 450, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings*, Federal Emergency Management Agency.
- [36]. [36]. Salmon C. G., Johnson J. E. and Malhas F. A., *Steel Structures: Design and Behavior*, Pearson.
- [37]. [37]. Segui W. T., *Steel Design*, Cengage Learning, 6th Edition, 2018.
- [38]. [38]. Trahair N., Bradford M., Nethercot D. et Gardner L., *The Behaviour and Design of Steel Structures to Eurocode 3*, CRC Press.
- [39]. [39]. Dubina D., Ungureanu V. and Landolfo R., *Design of Cold-Formed Steel Structures: Eurocode 3 Design Guide*, ECCS.
- [40]. [40]. ECCS, *European Recommendations for Steel Construction*, European Convention for Constructional Steelwork.
- [41]. Eurocode 3 : *Calcul des structures en acier*, EN 1993.
- [42]. [42]. Taranath B. S., *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*, CRC Press, 2016.
- [43]. [43]. Taranath B. S., *Tall Building Design: Steel, Concrete and Composite Systems*, CRC Press, 2017.
- [44]. [44]. Ali M. M. and Moon K. S., *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, Architectural Science Review.
- [45]. [45]. Smith B. S. and Coull A., *Tall Building Structures: Analysis and Design*, Wiley.
- [46]. Stafford Smith B., *Tall Building Structures*, Wiley-Interscience.
- [47]. [47]. Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH), *Outrigger Design for High-Rise Buildings*, Chicago.
- [48]. [48]. Johnson R. P., *Composite Structures of Steel and Concrete*, Wiley-Blackwell, 4th Edition, 2018.
- [49]. [49]. Chen Wai-Fah and Lui E. M., *Handbook of Structural Engineering*, CRC Press.
- [50]. [50]. Hicks S. et Lawson M., *Designers' Guide to EN 1994-1-1 Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures*, Thomas Telford.
-

-
- [51]. Eurocode 4 : *Calcul des structures mixtes acier-béton*, EN 1994.
- [52]. [52]. Nethercot D. A., *Composite Construction*, Spon Press.
- [53]. Engel H., *Structure Systems*, Hatje Cantz Verlag.
- [54]. [54]. Allen E. and Zalewski W., *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures*, Wiley.
- [55]. [55]. Schodek D. L., Bechthold M., Griggs K., Kao K. et Steinberg M., *Structures*, Pearson.
- [56]. [56]. Ambrose J. and Vergun D., *Design for Structural Stability of Buildings*, Wiley.
- [57]. Salvadori M. and Heller R., *Structure in Architecture: The Building of Buildings*, Prentice Hall.
- [58]. [58]. Mainstone R. J., *Developments in Structural Form*, Architectural Press.
- [59]. Règlement Parasismique Algérien RPA 2024.
- [60]. [60]. Eurocode 0 : Bases de calcul des structures (EN 1990).
- [61]. Eurocode 1 : Actions sur les structures (EN 1991).
- [62]. [62]. Eurocode 2 : Calcul des structures en béton (EN 1992).
- [63]. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier (EN 1993).
- [64]. [64]. Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton (EN 1994).
- [65]. Eurocode 7 : Calcul géotechnique (EN 1997).
- [66]. [66]. Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes (EN 1998).